

Octubre
2017



Trabajo de Fin de Grado

DISEÑO DE ANTENAS TRANSPARENTES PARA WIFI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES

AUTOR: ALFREDO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ
TUTORA: EVA RAJO IGLESIAS

INDEX

1. Abstract.....	4
2. State of Art	5
2.1 Patch Antennas.....	5
2.1 Meshed Patch Antennas	5
2.3 Feeding techniques	5
3. Design.....	6
3.1 Patch Antennas.....	6
3.2 Transparent Antenna	6
4. Experimental results	7
4.1 Mesh cooper wire	7
4.2 3D Printing	7
5. Conclusions and future lines	8

ÍNDICE

1. Introducción	9
1.1 Objetivos.....	10
2. Estado del arte.....	11
2.1. Antenas de parche	11
2.1.1 Características.....	12
2.1.2 Funcionamiento de la antena tipo parche	13
2.2 Antenas de parche malladas o “transparentes”	15
2.3 Tipos de alimentación	18
2.3.1 Conector coaxial.....	18
2.3.2 Alimentación por acoplamiento	19
2.3.3 Alimentación por línea de transmisión	20
3. Diseño de antena tipo parche	21
3.1 Composición de la antena.....	21
3.2 Diseño de antena con alimentación coaxial	23
3.2.1 Resultados de la simulación	23
3.3 Diseño de antena con alimentación por acoplamiento	25
3.3.1 Resultados de la simulación	26

3.4 Diseño de antena con alimentación por línea de transmisión	28
3.4.1 Resultados de la simulación	28
4. Diseño transparente	30
4.1 Resultados de la simulación	31
5. Resultados experimentales.....	33
5.1. Tela metálica	33
5.2. Impresión 3D.....	37
6. Presupuesto.....	40
6.1 Recursos materiales.....	40
6.2 Recursos humanos.....	40
6.3 Resumen del presupuesto	41
7. Marco regulador	43
7.1 Estándares 802.11 y bandas de frecuencia.....	44
7.2 Canales en la banda de 2.4 GHz.....	44
7.3 Frecuencias de los canales WiFi en la banda 2,4 GHz	45
8. Conclusiones y líneas futuras	47
9. Agradecimientos.....	48
10. Anexos.....	49
Anexo 1. Bibliografía.....	49
Anexo 2. Fotografías de los diseños fabricados	51
Anexo 3. Fotografías del proceso de testeo y caracterización	53
Anexo 4. Hojas de datos de materiales.....	54

1. Abstract

In our daily life we are used to seeing telecommunication antennas, be it telephony, television, radio, internet...

These occupy a physical and visual space in our environment. What if we could integrate these antennas into other objects in such a way that they would not be perceived?

This project focuses on the WiFi technology area with the aim of designing optically transparent antennas to reduce the visual impact of the antenna and better integrate with the environment.

The design of transparent antennas provides a better use of resources, such as the surface occupied, allowing its integration in sectors such as automotive, aeronautics, construction, military...

We aim to demonstrate the viability and performance of this type of antennas compared to traditional antennas.

These antennas find applications in many areas, but a clear example is their use in satellites where the antenna is integrated into solar panels using glass as dielectric. This allows a great saving and efficiency of the available surface area while allowing the photovoltaic cells to work correctly when the antenna has a transparent aspect.

The objective of this project is the design and manufacture of a transparent patch antenna. To carry out this project it will be divided into two parts:

- The first part will consist of the design of a square patch antenna which we will then manufacture with a conductive element based on copper wire cloth. For this design we will test various types of power supply and choose the one that offers the best performance characteristics.
- The second part of the work will consist of the design of a mesh patch antenna, in order to test the performance that this type of design can provide. This design will also be manufactured later using the air itself as dielectric.

2. State of Art

In this section we will talk about the background and theory of patch antennas. We will also see different types of power supply that can be given in this technology; and we will also discuss the design of this type of antenna with conductors in the form of mesh,

2.1 Patch Antennas

They have their origin in the microstrip technology. This type of antennas have a conductive patch of length L , width W and thickness T . The patch goes on top of the substrate of thickness H and electrical permittivity ϵ_r ; and in the lower part a ground plane will be placed.

We will see how it works and the considerations to be taken into account in its design.

2.1 Meshed Patch Antennas

The purpose of using the conductive material as a mesh rather than an opaque patch allows light to pass through the antenna optically, while the antenna continues to function properly as a radiant element.

In this project we intend to design and test the viability of this type of antennas and their good performance.

2.3 Feeding techniques

In the design of an antenna it is very important to consider the type of power that will be used, since without an efficient power supply system the microstrip antennas and antennas in general will not work properly. There are different methods of feeding a microstrip antenna to radiate in the most efficient way to the desired frequency by means of a correct coupling of impedances.

In this document we will distinguish three types of power supply for our patch antenna: coaxial feed, microstrip feed and proximity coupled microstrip feed.

3. Design

After a first approach to patch antennas in microstrip technology, we will present the results of the design carried out in the CST Studio software of these antennas.

3.1 Patch Antennas

The antennas designed in this study will all consist of a square patch to simplify the design. The dielectric used in this study is polycarbonate, known commercially as LEXAN, whose optical properties of transparency and its electrical permissiveness will allow us to achieve the purpose of this study.

Dielectric thicknesses rated in this study are 1/16, 1/8 and 1/4 inches (1.5875 mm, 3.175 mm and 6.35 mm respectively), as these are the LEXAN sheet thicknesses available in the university laboratory for future manufacture.

The electrical characteristics of the LEXAN provide us with an electrical permittivity $\epsilon_r = 2.75$

3.2 Transparent Antenna

With the realization of this design it has been sought to offer the maximum possible performance of the patch antenna but with the minimum amount of conductive material needed.

This is why the dielectric chosen in the design is the same air, since there is no better transparent substrate than the absence of it.

Microstrip feed has been chosen to combine a minimum visual impact of the connector location as well as requiring fewer dielectric layers and conductive material for implementation, which improves material reduction and visual impact.

Due to the feasibility of implementing this design in 3D printing, as we will see later, we have had to increase the thickness of the layers of conductive elements to 1 mm thick. Also, the chosen plate spacing is 1/8 inch, which allows a minimum handling of the piece while remaining visually very thin and transparent.

4. Experimental results

The following section presents the results obtained from the physical implementation of the design of transparent antennas object of this work.

4.1 Mesh cooper wire

For a first physical implementation, a mesh cooper wire has been used as a conductive element and the LEXAN polycarbonate material as a dielectric.

This combination is visually very transparent, as the fabric is of a very fine metric and hardly noticeable in backlight. Even though it is so fine, it still offers outstanding performance and electrical conductivity, which will give us very good results.

We have manufactured a pair of antennas with two power supplies: coaxial feed and proximity coupled microstrip feed.

4.2 3D Printing

For the second implementation, we have carried out the manufacturing of the transparent design using 3D printing.

This technology allows us to manufacture the prototype of the antenna in one piece with greater precision and speed than traditional methods.

As we have previously mentioned, the dielectric of this design is the air itself. It is therefore only necessary to print the layers of the conductive element (patch and ground plane) as well as some pivots to hold and separate these plates.

The 3D printing material we have used is an ABS plastic filament.

The last phase will be to paint with conductive silver paint the two plates that will make up the conductive elements and finally an SMA type connector will be installed.

5. Conclusions and future lines

Due to lack of time, I was unable to measure the gain of the manufactured antennas. The next step, and in order to present these results in the defense session of this work, will measure the antenna gain in the anechoic chamber. This process will be carried out using a reference antenna, thus establishing a radio link with our prototype.

In this work, the working frequency has been established at 2.4 GHz as the standard for WiFi 2.4 GHz (802.11b/g/n). As a future line, and if we wanted to be exact with the standard, we would have to redesign the antennas for a center frequency of 2.45 GHz so that we would be at the center of the frequencies of the channels into which the standard is divided.

Even so, and looking at the good results obtained, we can see that the design of this type of antennas transparent or visually little intrusive antennas, object of this project, is a viable and operative solution. It also includes the latest technologies such as 3D printing.

1. Introducción

En nuestro día a día estamos acostumbrados a ver antenas de telecomunicaciones, ya sean de telefonía, televisión, radio, internet...

Estas ocupan un espacio físico y visual en nuestro entorno. ¿Qué pasaría si consiguiésemos integrar estas antenas en otros objetos de manera que no se percibiesen?

Este proyecto se centra en el ámbito de la tecnología WiFi con el objetivo de diseñar antenas ópticamente transparentes de manera que se reduzca el impacto visual de la antena y se integren mejor con el entorno.

El diseño de antenas transparentes proporciona un mejor aprovechamiento de los recursos, como la superficie ocupada, permitiendo su integración en sectores como la automoción, aeronáutica, construcción, militar...

Pretendemos demostrar la viabilidad y rendimiento de este tipo de antenas frente a las tradicionales.

Estas antenas encuentran aplicaciones en muchas áreas, pero un ejemplo claro es su uso en satélites donde se integra la antena en los paneles solares utilizando el vidrio como dieléctrico. Esto permite un gran ahorro y eficiencia de la superficie disponible a la vez que permite el correcto funcionamiento de las células fotovoltaicas al presentar la antena un aspecto transparente.

1.1 Objetivos

El objetivo de este proyecto es el diseño y fabricación de una antena tipo parche transparente. Para llevar a cabo este proyecto se va a dividir en dos partes:

- La primera parte consistirá en el diseño de una antena de tipo parche cuadrada que posteriormente fabricaremos con un elemento conductor basado en tela metálica de cobre. Para este diseño probaremos varios tipos de alimentación y elegiremos la que mejores características de rendimiento nos ofrezca.
- La segunda parte del trabajo consistirá en el diseño de una antena de tipo parche mallada, con el propósito de comprobar el rendimiento que puede proporcionar este tipo de diseño. Así mismo posteriormente se fabricará este diseño empleando como dieléctrico el propio aire.

Todas las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo se han realizado mediante el uso de la herramienta *CST Studio Suite*. Este software es un programa específico para el diseño y simulación de antenas y otros componentes de radiofrecuencia.

Como objetivos a la hora de diseñar la antena se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones.

En las simulaciones se analizará el parámetro de reflexión S_{11} para comprobar la adaptación de la antena a la frecuencia deseada de 2.4 GHz

Para calcular el ancho de banda se fijará el que esté por debajo de los -10 dB y se intentará que este ancho de banda esté lo más centrado a la frecuencia de trabajo de 2.4 GHz.

También se comprobará la impedancia de referencia, para verificar que está lo más próxima a 50Ω .

Y por último se comprobará su diagrama de radiación observando los valores de directividad y eficiencia de radiación.

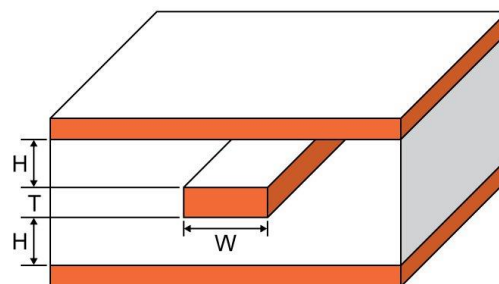
2. Estado del arte

En este apartado daremos unas pinceladas sobre los antecedentes y teoría de las antenas de tipo parche. Veremos también diferentes tipos de alimentación que se pueden dar en esta tecnología; y además comentaremos el diseño de este tipo de antena con conductores en forma de malla,

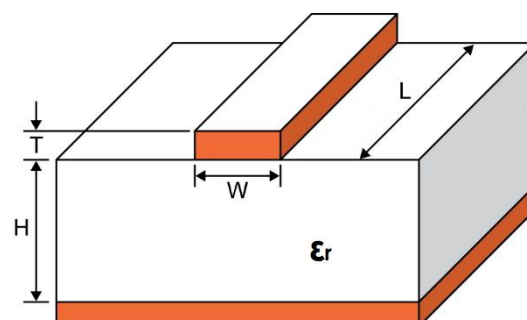
2.1. Antenas de parche

Las antenas tipo parche se basan en la tecnología microstrip. Esta tecnología presenta una evolución hacia diseños cada vez más reducidos que pudiesen ser fácilmente acoplados en cualquier dispositivo.

Los primeros circuitos impresos para microondas datan del año 50 bajo el nombre de striplines. Una stripline está formada por un conductor delgado en el interior de un dieléctrico, y encerrado por dos capas metálicas en la parte superior e inferior las cuales están al mismo potencial, referenciadas al plano de masa. Las stripline encierran la mayor parte de sus campos dentro del dieléctrico.



Años más tarde, se dieron a conocer las primeras publicaciones sobre las líneas microstrip. La principal diferencia respecto a las striplines es la desaparición de la parte superior del dieléctrico y de la capa metálica, dejando de este modo la línea conductora en el exterior.

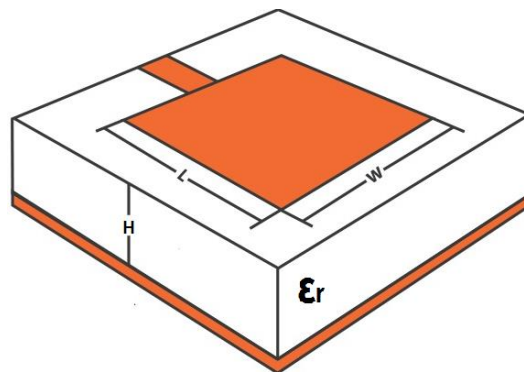


En aquellos tiempos esta estructura abierta era utilizada sobre sustratos que presentaban una baja permitividad y debida a eso presentaba grandes pérdidas por radiación.

Precisamente esta desventaja (la radiación) se reutilizó para fabricar antenas en lugar de líneas de transmisión y de ahí provienen las antenas de parche.

2.1.1 Características

Como hemos visto anteriormente las antenas de parche tienen su origen en la tecnología microstrip. Este tipo de antenas presentan un parche conductor de largo L , ancho W y grosor T . El parche va en la parte superior del sustrato de espesor H y permitividad eléctrica ϵ_r , y en la parte inferior se colocará un plano de masa. A continuación se muestra una imagen de este tipo de antena:



2.1.2 Funcionamiento de la antena tipo parche

El parche de este tipo de antenas puede verse como una sección ancha de la línea microstrip terminada en circuito abierto en sus dos extremos. Es decir, se trata de un circuito resonante a una frecuencia tal que su longitud b sea próxima a un múltiplo de media longitud de onda:

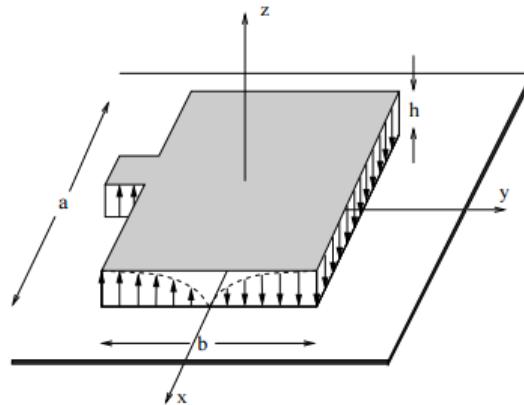
$$b \simeq n \frac{\lambda_d}{2}$$

Donde “ n ” es un número entero y “ λ_d ” es la longitud de onda en el dieléctrico (cuya constante dieléctrica es “ ϵ_r ”):

$$\lambda_d = \frac{c_o}{f \sqrt{\epsilon_r}}$$

Donde “ c_o ” es la velocidad de la luz en el vacío.

La siguiente imagen muestra la configuración del campo eléctrico de una antena de tipo parche para $n=1$, es decir, para el modo fundamental de radiación.



La dirección que presenta el campo eléctrico es normal al parche y al plano de masa colocado en la parte inferior del sustrato.

Como se puede apreciar en la imagen, la distribución del campo eléctrico en la dirección del eje z es constante. Respecto al eje y se puede observar que la variación del campo eléctrico es sinusoidal con máximos en valor absoluto en los extremos y un nulo en el centro.

Cabe destacar que el sentido del campo E_z es de signos opuestos en los extremos. Siendo la variación de campo en el eje x nula.

Basándose en lo anterior, se puede decir que el campo magnético está orientado según el eje x . La variación que presenta en el eje y es sinusoidal dando lugar a dos nulos en los extremos y un máximo en el centro, justo al contrario que sucedía con el campo eléctrico. Del mismo modo que en el campo E_z la variación que presenta el campo magnético en el eje x es nula.

Se puede expresar la configuración de los campos en el parche de la siguiente manera:

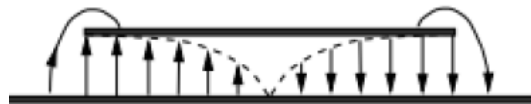
$$|E_z| = E_0 \cos \frac{\pi(y + b/2)}{b}$$

$$|H_x| = H_0 \sin \frac{\pi(y + b/2)}{b}$$

A esta distribución, habría que añadir los denominados “campos periféricos” ya que el campo no termina exactamente en los bordes del parche. Este efecto depende de la frecuencia de operación a la que se trabaje y del sustrato utilizado. Esto tiene como consecuencia un alargamiento efectivo de las dimensiones del parche ($b_e > b$) y ($a_e > a$).

Es por ello que a la hora de diseñar la antena tipo parche, hay que tener en cuenta este efecto y elegir un ancho del parche (“ b ”) ligeramente inferior a $\lambda_d/2$ (o múltiplo de ésta) con el objetivo de tener en cuenta el alargamiento efectivo en las dimensiones del parche producido por el campo en los bordes del mismo.

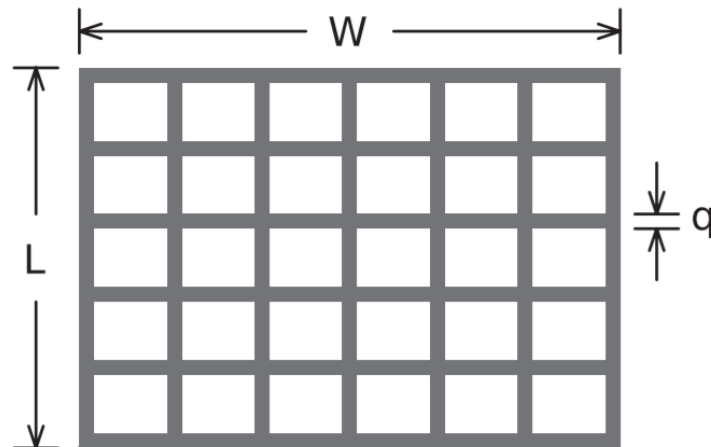
A continuación se muestra una imagen de este concepto:



2.2 Antenas de parche malladas o “transparentes”

El propósito del uso de material conductor en forma de malla en vez de ser un parche opaco permite que ópticamente la luz pase a través de la antena, mientras que ésta sigue funcionando correctamente como elemento radiante.

Esto, por supuesto, requiere que el diseño tenga suficientes líneas en la malla para prevenir fugas significativas de señales de microondas.



Diversos estudios confluyen que la frecuencia de resonancia, ganancia y eficiencia de una antena de parche de malla disminuye cuando aumenta la transparencia de la antena. Esto significa que es necesario optimizar simultáneamente la geometría para la transparencia óptica y las características de radiación.

También se señaló que la impedancia de entrada de una antena de parche de malla se hace mayor a medida que aumenta su transparencia.

Por lo tanto hay que ir jugando tanto con el espesor del dieléctrico como con la anchura de las rejillas del material conductor y su distribución en forma de cuadrícula.

A continuación mostramos como ejemplo los resultados llevados a cabo en un estudio sobre cómo influye la transparencia de la malla en el diagrama de radiación de la antena. Mostrando unos resultados muy semejantes en ambos casos.

Diagrama de radiación para la antena de parche sólido.

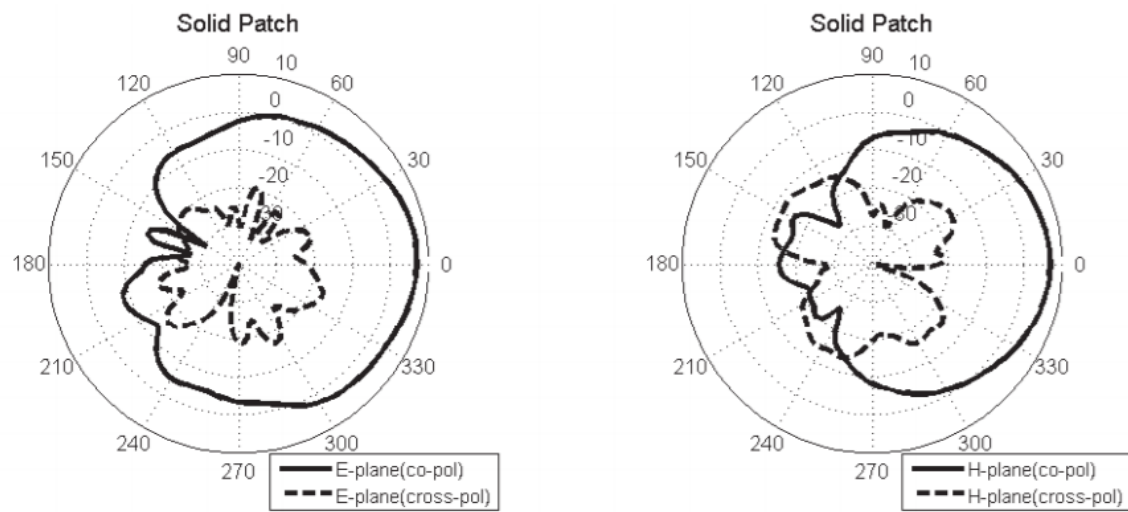
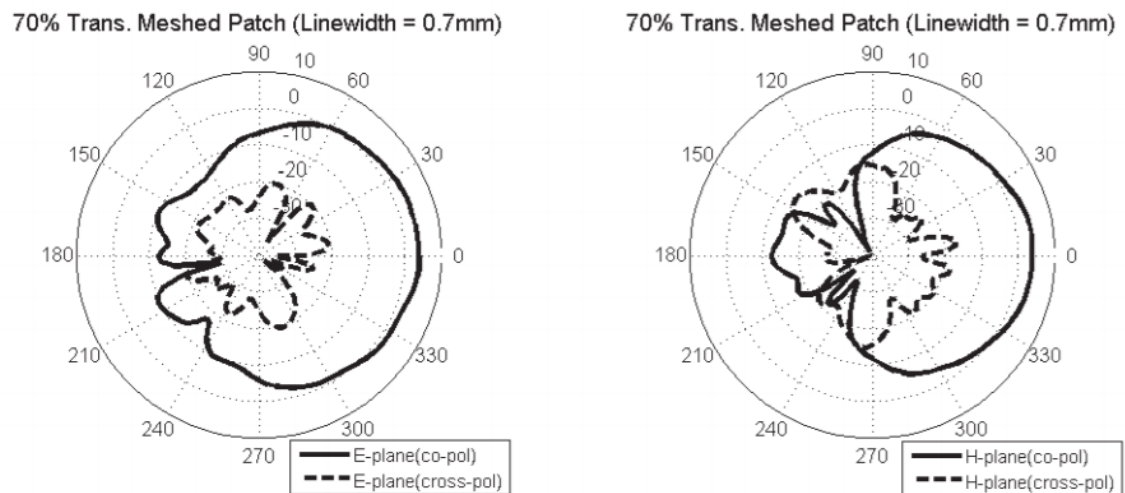


Diagrama de radiación para la antena de parche mallada con una transparencia óptica del 70%.



Por supuesto estos resultados son orientativos. En este proyecto nos proponemos diseñar y comprobar la viabilidad de este tipo de antenas y su buen rendimiento.

La transparencia óptica de la antena se define mediante el porcentaje de área no ocupada por el material conductor y que se puede ver a través de ella, entre el área total ocupada por el parche. Es decir,

$$Transparencia = \frac{\text{Área}(\text{total}_{\text{parche}}) - \text{Área}(\text{material}_{\text{conductor}})}{\text{Área}(\text{total}_{\text{parche}})} * 100$$

Como veremos más adelante, se han obtenido resultados muy interesantes mediante el diseño de este tipo de antenas frente al uso del tradicional parche.

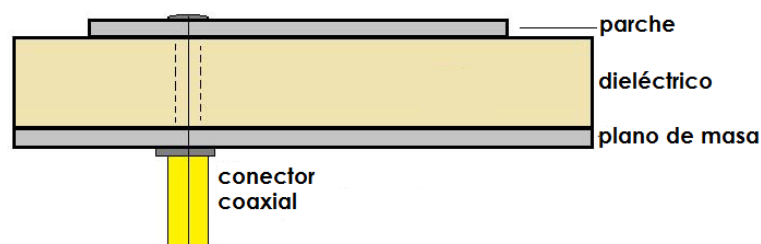
2.3 Tipos de alimentación

En el diseño de una antena es muy importante tener en cuenta el tipo de alimentación que se utilizará, ya que sin un sistema eficaz de alimentación las antenas microstrip y las antenas en general, no funcionarán de una manera correcta. Hay diferentes métodos de alimentación de una antena microstrip para que radie de la forma más eficiente a la frecuencia deseada mediante un correcto acoplamiento de impedancias.

En este documento distinguiremos tres tipos de alimentación para nuestra antena de parche, los cuales se describen a continuación.

2.3.1 Conector coaxial

Es el método más común de alimentación en las antenas de tipo parche. El acoplamiento de la impedancia variará según sea la posición de la sonda en relación con el parche, ya que hay que lograr alcanzar el punto de impedancia 50Ω .



El conector SMA está acoplado al lado posterior de la antena microstrip (el plano de masa) y el conector central del coaxial pasará a través del sustrato e irá soldado al parche, como se muestra en la figura anterior.

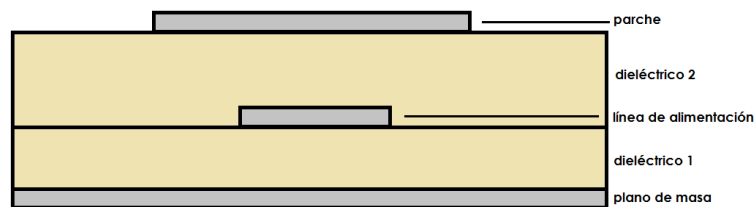
Visualmente es un método de alimentación intrusivo, puesto que el conector está bastante centrado y expuesto a la vista, y además hay que añadir la presencia visual del cable.

2.3.2 Alimentación por acoplamiento

Este método de alimentación también conocido como “alimentación de microstrip acoplada electromagnéticamente” se basa en el comportamiento capacitivo entre el parche y la línea de alimentación.

Aquí se puede optimizar el elemento radiante y la estructura de alimentación por separado.

El parche estará en la parte superior, el plano de masa en el fondo y una línea de transmisión microstrip estará conectada a la fuente de alimentación y situada entre las dos capas de dieléctrico, como se muestra en la siguiente figura:



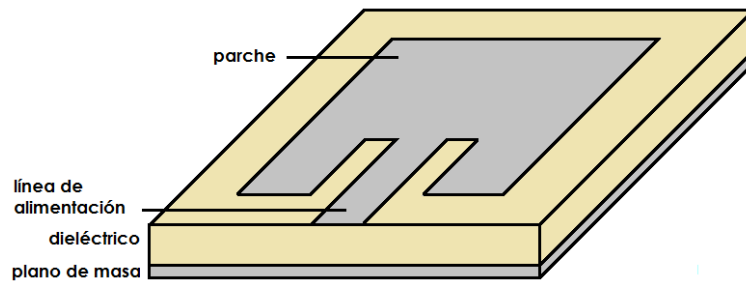
Para obtener unas mejores características del elemento radiante se puede utilizar sustratos más gruesos con permitividades eléctricas bajas, mientras que para la alimentación se utilizará sustratos delgados con permitividades eléctricas altas.

Visualmente es un método de alimentación poco intrusivo, puesto que el conector está situado en un lado de la antena.

2.3.3 Alimentación por línea de transmisión

La principal desventaja que presenta esta alimentación es que requiere la optimización conjunta del sistema de alimentación y del parche de la antena, ya que comparten el mismo sustrato.

Se basa en la alimentación del parche a través de una línea de transmisión microstrip que penetra hasta casi el centro del mismo.



Aquí el acoplamiento de la impedancia viene dado por la profundidad de la inserción. Normalmente se utilizan conectores normalizados a 50Ω y por lo tanto hay que diseñar la línea que alimenta al parche a esa impedancia. Sin embargo la impedancia en el borde de la antena es muy alta y por eso hay que realizar esas inserciones en el parche, para alcanzar el punto de impedancia 50Ω .

Estas incisiones también permiten que se minimice la posible deformación o desviación del haz de radiación de la antena, consiguiendo la máxima directividad y eficiencia de radiación.

Visualmente es el método de alimentación menos intrusivo junto con el anterior, puesto que el conector está situado también en un lado de la antena,

3. Diseño de antena tipo parche

Después de una primera aproximación a las antenas de tipo parche en tecnología microstrip, vamos a presentar los resultados del diseño llevado a cabo en el software *CST Studio* de estas antenas para cada tipo de alimentación visto anteriormente.

3.1 Composición de la antena

Las antenas diseñadas en este estudio estarán todas formadas por un parche de forma cuadrada, para simplificar el diseño.

El dieléctrico utilizado en este estudio es policarbonato, conocido comercialmente como LEXAN, cuyas propiedades ópticas de transparencia y su permisividad eléctrica nos permitirán lograr la finalidad de este estudio.



La resina de policarbonato LEXAN es un termoplástico técnico amorfo, caracterizado por sus excepcionales propiedades térmicas, eléctricas, ópticas y mecánicas. Sus características más destacadas son:

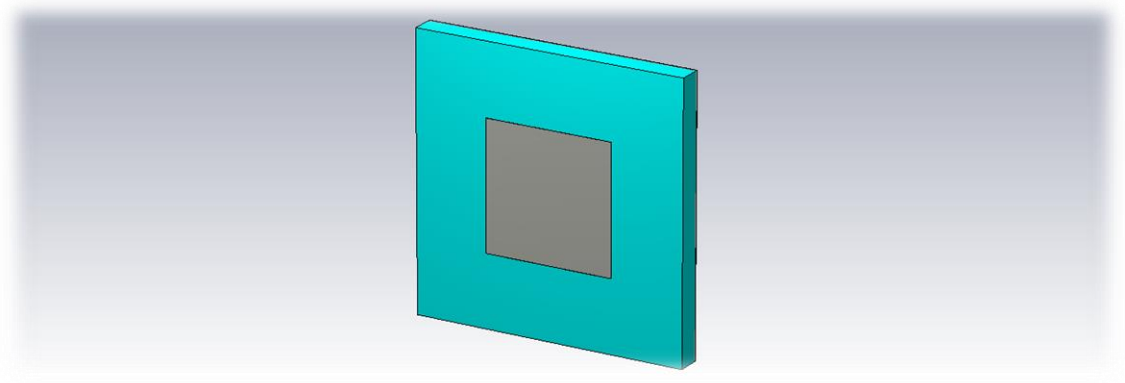
- Calidad óptica: desde opaco a perfectamente transparente.
- Resistencia: a los rayos UV y a las condiciones meteorológicas.
- Dureza: gran resistencia a impactos.
- Termo-resistencia:
- Estabilidad: conserva sus dimensiones intactas.

Los grosores de dieléctrico valorados en este estudio son de 1/16, 1/8 y 1/4 de pulgada, es decir, 1.5875 mm, 3.175 mm y 6.35 mm respectivamente, por ser los grosores de las láminas de LEXAN que hay disponibles en el laboratorio de la universidad para la futura fabricación.

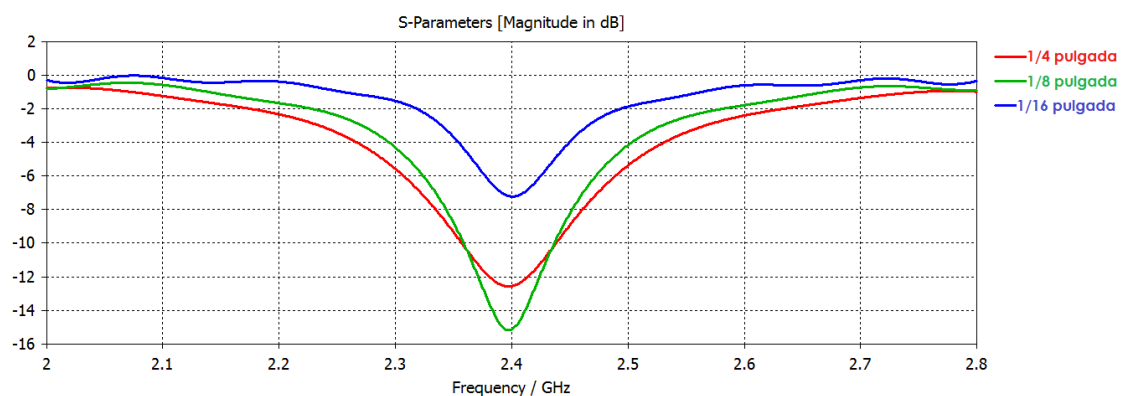
Las características eléctricas del LEXAN nos proporcionan una permitividad eléctrica de $\epsilon_r = 2.75$

En función del tipo de alimentación, veremos que los resultados serán mejores dependiendo de los grosores del dieléctrico utilizados.

3.2 Diseño de antena con alimentación coaxial



Hemos probado este diseño con varios espesores del dieléctrico y estos son los diferentes parámetros S_{11} obtenidos:



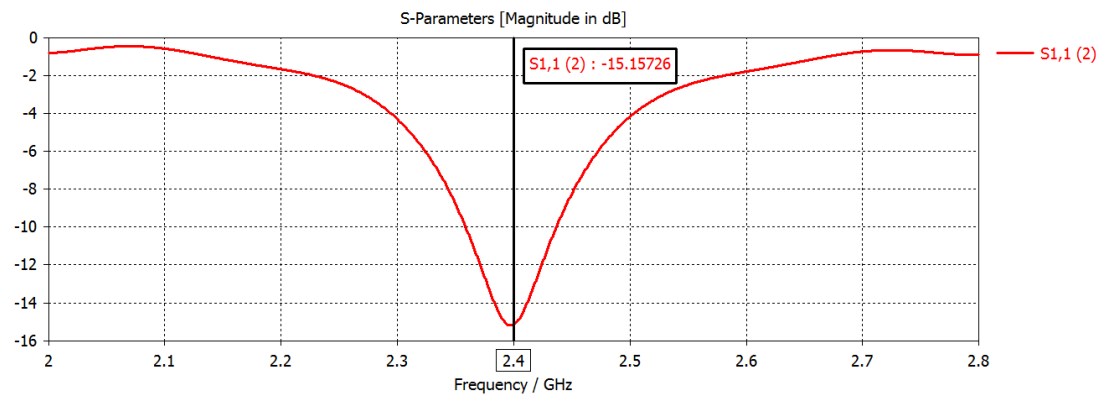
El grosor del dieléctrico elegido es de 1/8 de pulgada, ya que como podemos observar, presenta muy buenos resultados tanto de adaptación en la frecuencia deseada como en ancho de banda.

3.2.1 Resultados de la simulación

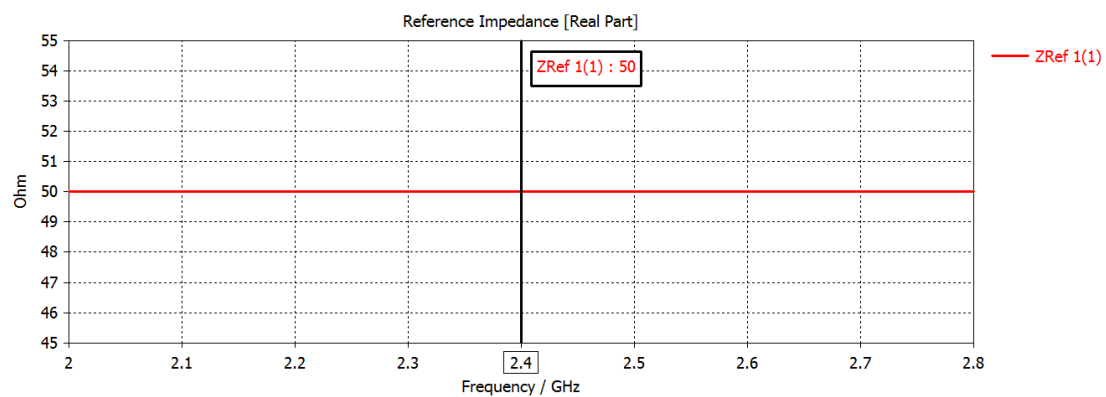
A continuación mostramos los resultados de la simulación de este diseño.

En primer lugar podemos observar el parámetro S_{11} que nos muestra que la antena está adaptada a la frecuencia de trabajo deseada de 2.4 GHz.

El valor obtenido es $S_{11} = -15.16$ dB y tenemos un ancho de banda aproximado de 90 MHz.



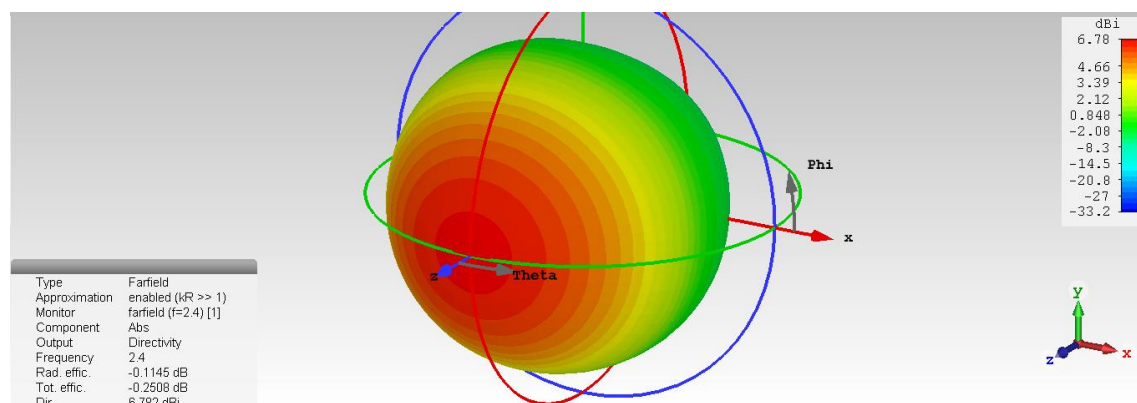
Lo siguiente es comprobar la impedancia de referencia, la cual está perfectamente ajustada en 50Ω .



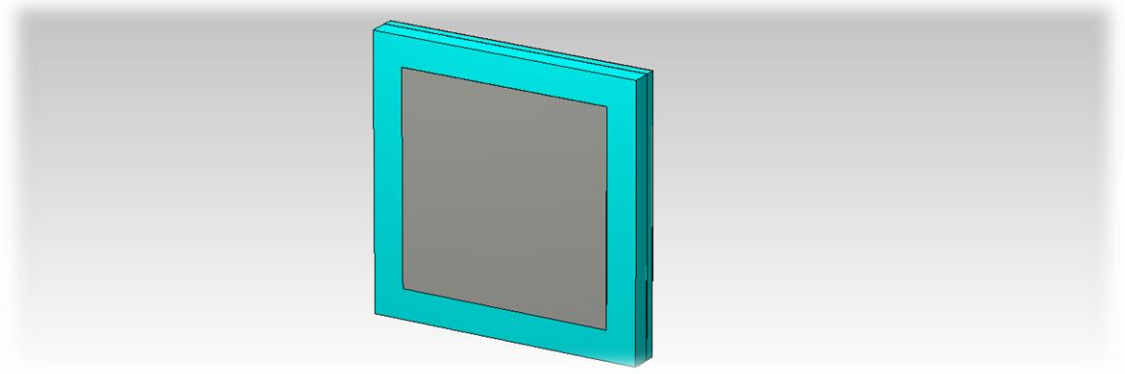
Por último, observamos el diagrama de radiación de la antena en 3D, el cual nos permite comprobar la correcta excitación de la antena, la directividad del haz y la eficiencia de radiación.-

El valor obtenido de directividad es igual a 6.782 dBi y la eficiencia de radiación es igual a -0.1145 dB, es decir, un 97.4%.

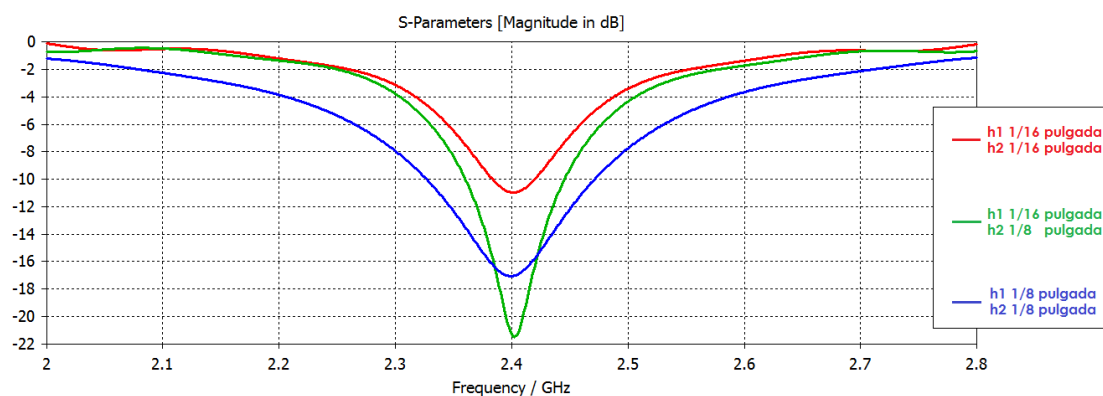
Comprobamos que el lóbulo principal es muy uniforme y no presenta ninguna deformación notable, fruto de una buena colocación del puerto de alimentación del parche.



3.3 Diseño de antena con alimentación por acoplamiento



Hemos probado este diseño con varios espesores del dieléctrico y estos son los diferentes parámetros S_{11} obtenidos:

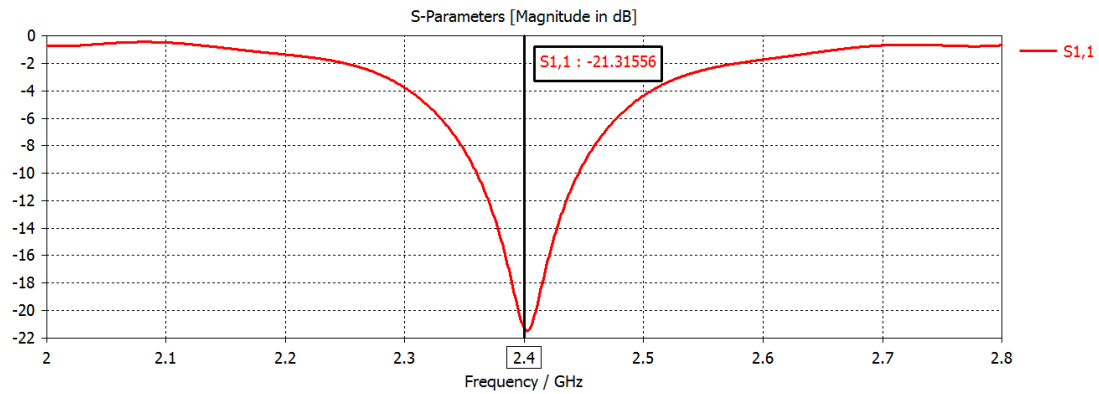


Como podemos observar, los mejores resultados tanto de adaptación en la frecuencia deseada como en ancho de banda, los obtenemos con espesores diferentes, donde se ha empleado un grosor de 1/16 de pulgada para la primera capa de dieléctrico (h1) y un grosor de 1/8 de pulgada para la segunda capa (h2).

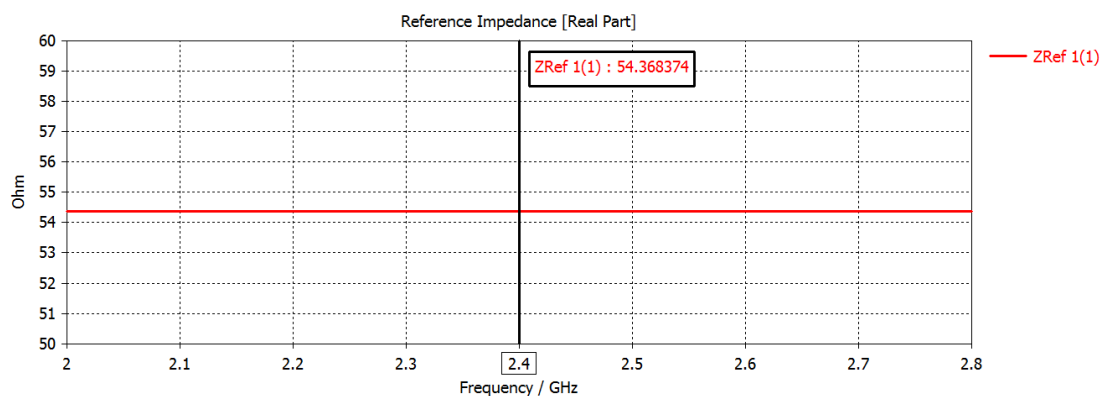
Se han descartado los resultados obtenidos utilizando el espesor 1/4 de pulgada debido a no conseguir la adaptación en la frecuencia de trabajo deseada.

3.3.1 Resultados de la simulación

En primer lugar, tenemos que el parámetro $S_{11} = -21.32$ dB y el ancho de banda es aproximadamente de 90 MHz.



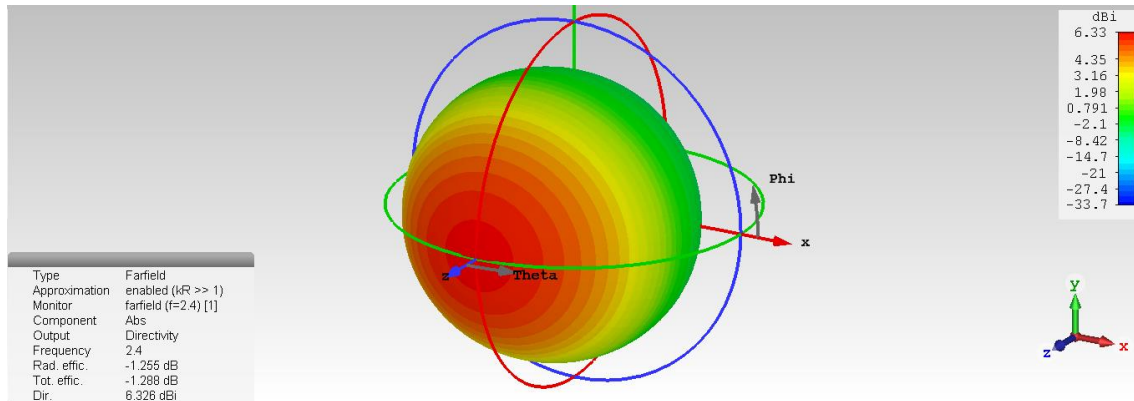
En este caso, la impedancia de referencia está un poco por encima de 50Ω, siendo 54.37Ω un valor muy correcto.



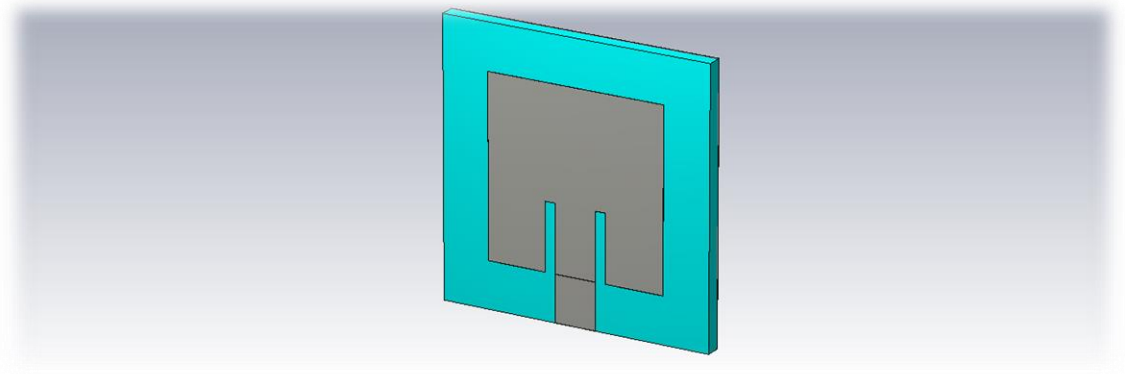
Por último, observamos el diagrama de radiación de la antena en 3D.

El valor obtenido de directividad es igual a 6.326 dBi y la eficiencia de radiación es igual a -1.255 dB, es decir, un 74.9%, la cual es una cifra bastante buena.

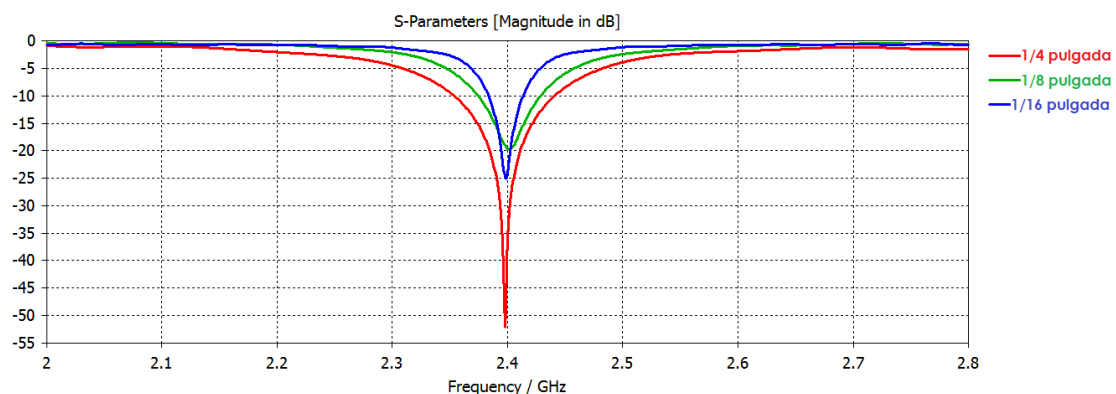
Comprobamos que el lóbulo principal es muy uniforme y no presenta ninguna deformación notable, debido a una buena colocación de la línea microstrip que alimentación del parche.



3.4 Diseño de antena con alimentación por línea de transmisión



Hemos probado este diseño con varios espesores del dieléctrico y estos son los diferentes parámetros S_{11} obtenidos:

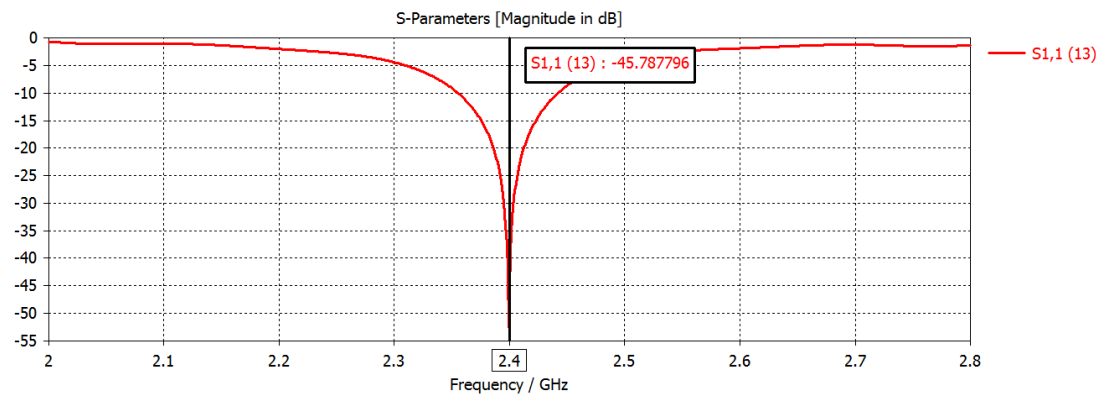


El grosor del dieléctrico elegido es de 1/4 de pulgada, ya que como podemos observar, presenta muy buenos resultados tanto de adaptación en la frecuencia deseada como en ancho de banda.

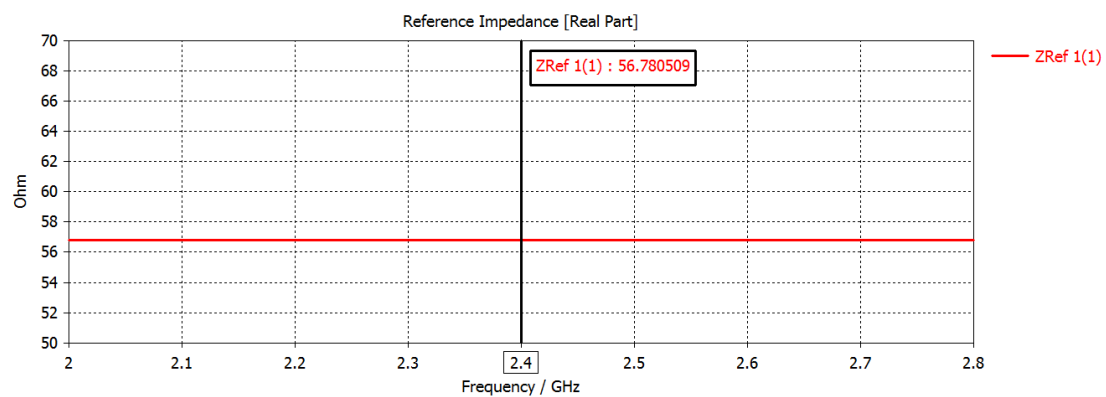
3.4.1 Resultados de la simulación

A continuación presentamos los resultados de este diseño.

En primer lugar, tenemos que el parámetro $S_{11} = -45.79$ dB y el ancho de banda es aproximadamente de 90 MHz.



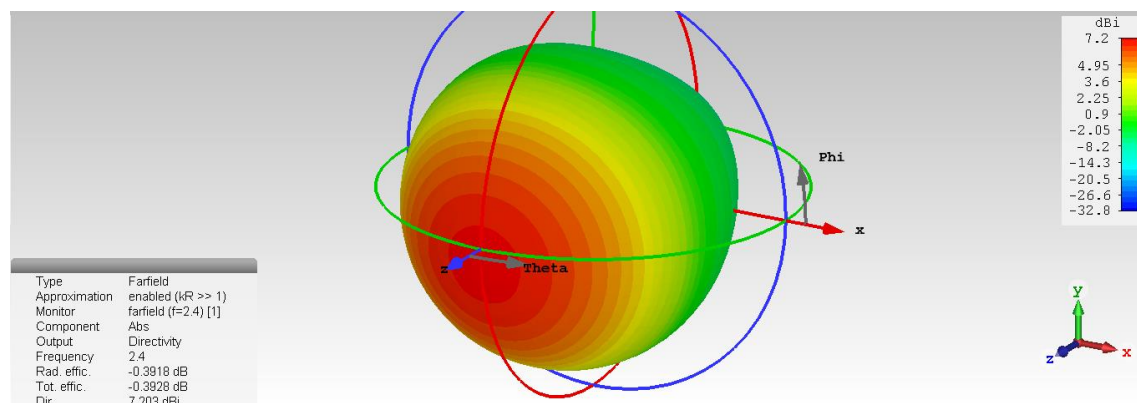
En este caso, la impedancia de referencia está un poco por encima de 50Ω, siendo 56.78Ω un valor muy correcto.



Por último, observamos el diagrama de radiación de la antena en 3D.

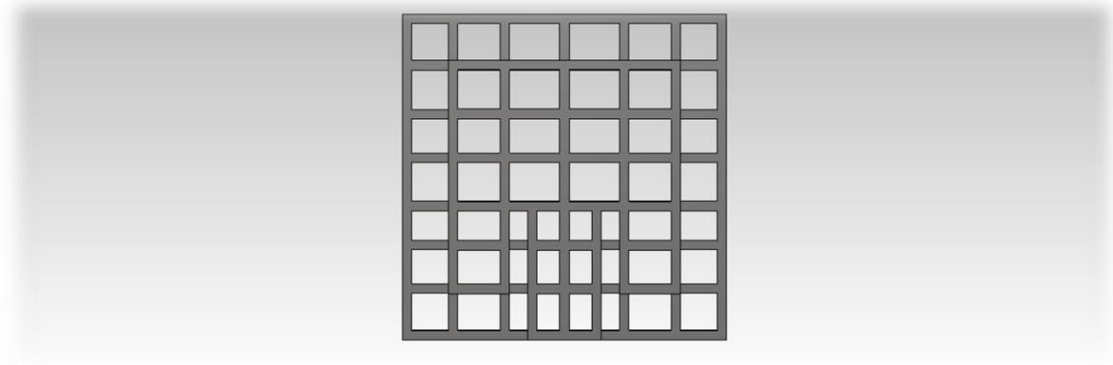
El valor obtenido de directividad es igual a 7.203 dBi y la eficiencia de radiación es igual a -0.3918 dB, es decir, un 91.37%, la cual es una cifra muy buena.

Comprobamos que el lóbulo principal es muy uniforme y no presenta ninguna deformación notable, debido a una buena inserción de la línea de alimentación dentro del parche.



4. Diseño transparente

Con la realización de este diseño se ha buscado ofrecer el máximo rendimiento posible de la antena de parche pero con la mínima cantidad de material conductor necesario.



Se busca que la antena sea visualmente lo más transparente posible y que siga ofreciendo un buen rendimiento.

Es por ello que el dieléctrico elegido en el diseño es el mismo aire, puesto que no existe mejor sustrato transparente que la ausencia del mismo.

Se ha optado por el tipo de alimentación mediante línea de transmisión por combinar un mínimo impacto visual de la ubicación del conector así como necesitar menos capas de dieléctrico y material conductor para su implementación, lo cual mejora la reducción de material y el impacto visual.

Por viabilidad de implementación de este diseño en impresión 3D, como veremos posteriormente, hemos tenido que aumentar el grosor de las capas de elementos conductores a 1 mm de grosor. Así mismo la separación entre placas elegida es de 1/8 pulgadas, que permite un mínimo de manejo de la pieza a la vez que sigue siendo visualmente muy fina y transparente.

La transparencia conseguida en el diseño final es de:

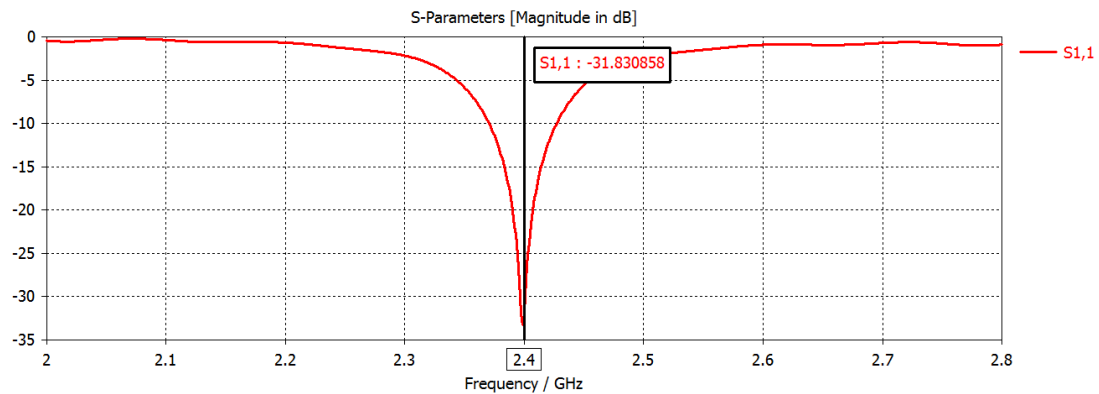
$$\text{Transparencia} = \frac{4783.11 \text{ mm}^2 - 1952.44 \text{ mm}^2}{4783.11 \text{ mm}^2} * 100 = 59.18 \%$$

Como veremos en el siguiente apartado este diseño presenta muy buenos resultados.

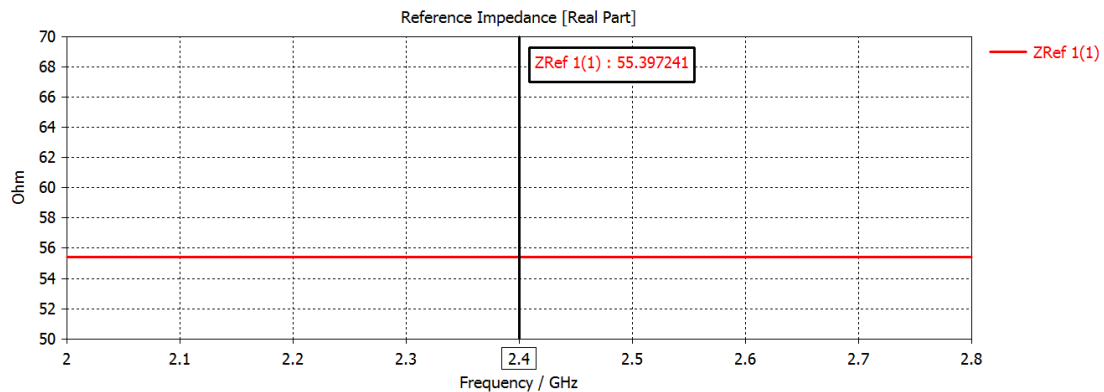
4.1 Resultados de la simulación

A continuación presentamos los resultados de este diseño.

En primer lugar, tenemos que el parámetro $S_{11} = -31.83$ dB y el ancho de banda es aproximadamente de 60 MHz.



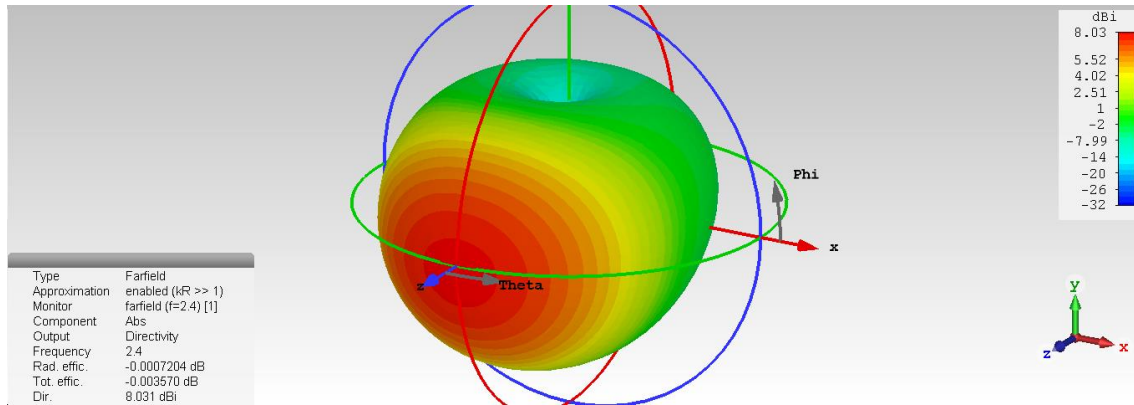
En este caso, la impedancia de referencia está un poco por encima de 50Ω , siendo 55.40Ω un valor muy correcto.



Por último, observamos el diagrama de radiación de la antena en 3D.

El valor obtenido de directividad es igual a 8.031 dBi y la eficiencia de radiación es igual a -0.0007 dB, es decir, un 100%, la cual es una cifra excelente.

Comprobamos que el lóbulo principal es muy uniforme y no presenta ninguna deformación notable, debido a una buena inserción de la línea de alimentación dentro del parche. Así mismo vemos que la directividad es casi óptima.



5. Resultados experimentales

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos de la implementación física del diseño de antenas transparentes objeto de este trabajo.

5.1. Tela metálica

Para una primera implementación física se ha empleado una tela metálica de cobre como elemento conductor y el material policarbonato LEXAN como dieléctrico.

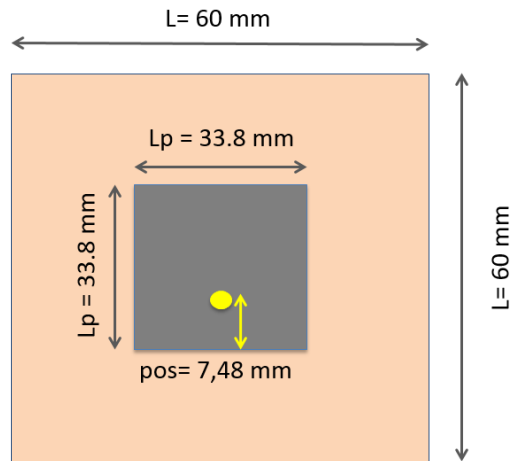


Esta combinación es visualmente muy transparente, ya que la tela es de una métrica muy fina y apenas se percibe a contraluz. Pese a ser tan fina sigue ofreciendo un rendimiento y conductividad eléctrica notables, lo que nos proporcionará muy buenos resultados.

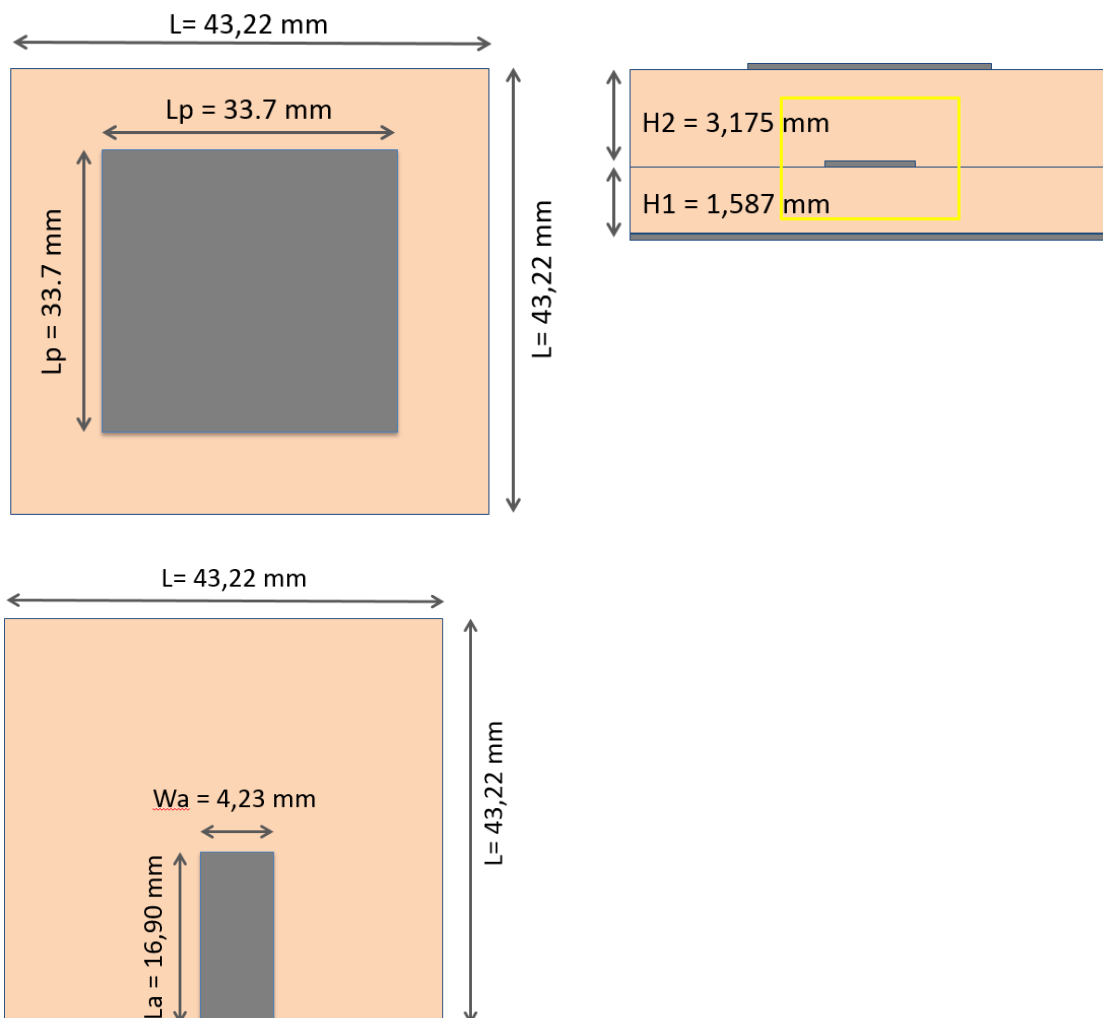
Hemos fabricado un par de antenas con dos tipos de alimentación: alimentación coaxial y alimentación por acoplamiento.

A continuación mostramos las dimensiones y características de las antenas fabricadas.

Para la antena de alimentación coaxial situado el conector SMA vertical en el centro de uno de los lados y a 7,48 mm del borde del parche. El grosor del dieléctrico LEXAN es de 6.35 mm o 1/4 de pulgada.



Para la antena de alimentación por acoplamiento el conector SMA se sitúa perpendicular a la antena abarcando el plano de masa y la línea de transmisión entre las dos capas de dieléctrico.

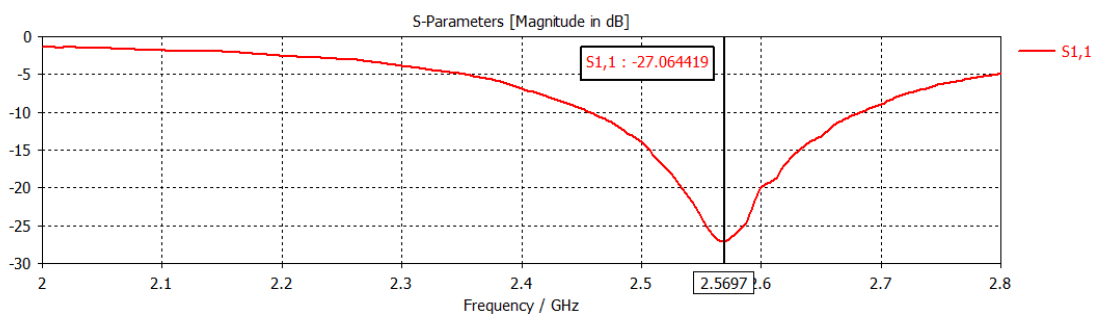


Los grosores del dieléctrico LEXAN son de 1,587 mm o 1/16 de pulgada para la capa 1 y de 3,175 mm o 1/4 de pulgada para la capa 2.

En el laboratorio hemos llevado a cabo el análisis del funcionamiento y rendimiento de las antenas fabricadas. Para ello hemos usado un equipo analizador de redes (VNA – Vector Network Analyzer) de manera que visualizamos la adaptación de la antenna, parámetro S_{11} , para ver si trabaja en la frecuencia deseada.

A continuación mostramos los resultados obtenidos para ambas antenas.

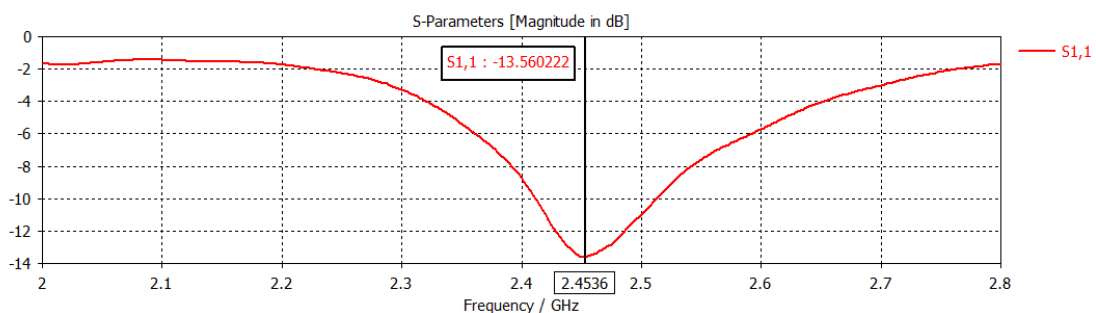
Para la antena de alimentación coaxial obtenemos la siguiente gráfica de parámetros S.



Podemos observar que la frecuencia de trabajo se ha desplazado de 2.4 GHz a 2.57 GHz aproximadamente. Pese a ello, en la frecuencia de 2.4 GHz tenemos un valor de $S_{11} = -7$ dB que sigue siendo bueno.

Obtenemos que el parámetro $S_{11} = -27.06$ dB y el ancho de banda es aproximadamente de 230 MHz.

Para la antena de alimentación por acoplamiento obtenemos la siguiente gráfica de parámetros S.



Podemos observar que la frecuencia de trabajo se ha desplazado levemente de 2.4 GHz a 2.45 GHz. Pese a ello, en la frecuencia de 2.4 GHz tenemos un valor de $S_{11} = -7$ dB que sigue siendo bueno.

Obtenemos que el parámetro $S_{11} = -13.56$ dB y el ancho de banda es aproximadamente de 100 MHz.

5.2. Impresión 3D

Para la segunda implementación, hemos llevado a cabo la fabricación del diseño transparente mediante la impresión 3D.



Esta tecnología nos permite fabricar el prototipo de la antena en una sola pieza con mayor precisión y rapidez que con los métodos tradicionales.

Como hemos comentado anteriormente el dieléctrico de este diseño es el propio aire. Por lo tanto solo es necesario imprimir las capas del que va a ser el elemento conductor (parche y plano de masa) así como unos pivotes para sujetar y separar dichas placas.

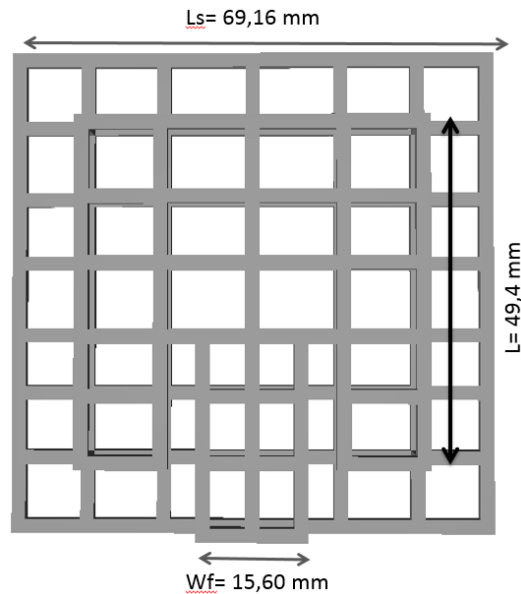
El material de impresión 3D que hemos empleado se trata de un filamento plástico ABS, el cual se caracteriza por su rigidez, dureza y resistencia y permite perfectamente su pintado, lo que nos permitirá la siguiente fase del proceso de fabricación.

Dicha fase consiste en pintar con pintura conductiva con base de plata las dos placas que harán de elementos conductores. Los pivotes serán lo único que separe dichas placas y aislarán eléctricamente las mismas.

Por último se instalará un conector de tipo SMA entre las dos placas para alimentar la antena. Dicho conector irá pegado con un pegamento especial para metales, ya que no es viable un proceso de soldadura, el cual derretiría el plástico ABS con el calor producido.

Hay que tener mucho cuidado en la manipulación de este prototipo pues la única sujeción entre las placas son unos pequeños pivotes, y en el caso del conector, al ser el dieléctrico el aire, sólo se sustenta por sus puntos de contacto con las placas conductoras.

A continuación mostramos las dimensiones y características de la antena fabricada mediante impresión 3D.

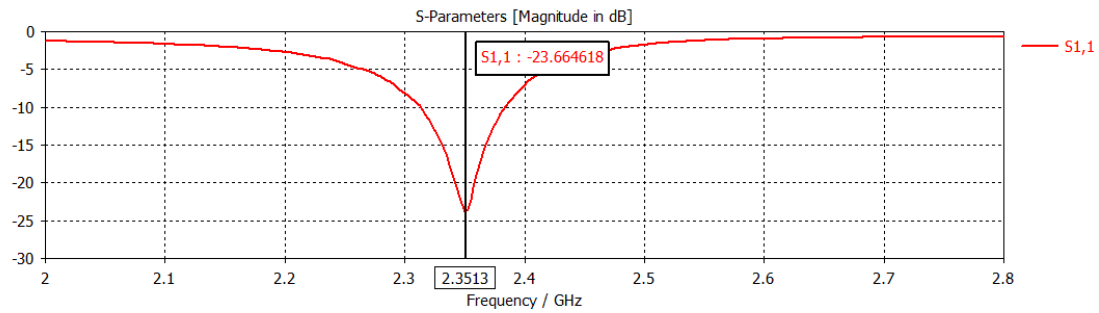


La separación entre placas es de 3.175 mm o 1/8 de pulgada.

Y la anchura de las diferentes líneas horizontales y verticales que componen el parche y el plano de masa es de 2 mm.

Como ya comentamos por motivos técnicos y para poder llevar a cabo su fabricación 3D sin que la pieza quedara muy débil y se pudiera romper, el grosor de las capas se elevó a 1 mm. Este grosor es muy elevado si lo comparamos con los valores habituales de diseño que están en el orden de 50 micras.

A continuación mostramos los resultados obtenidos para este diseño. Al igual que en el apartado anterior hemos usado el equipo analizador de redes (VNA – Vector Network Analyzer) para visualizar la adaptación de la antena, parámetro S_{11} , para ver si trabaja en la frecuencia deseada.



Podemos observar que la frecuencia de trabajo se ha desplazado de 2.4 GHz a 2.35 GHz, es decir apenas un 2%. Pese a ello, en la frecuencia de 2.4 GHz tenemos un valor de $S_{11} = -7$ dB que sigue siendo bueno.

Obtenemos que el parámetro $S_{11} = -23.66$ dB en su valor máximo a 2.35 GHz y el ancho de banda es aproximadamente de 80 MHz.

Los resultados son muy buenos pese a la pequeña variación en la frecuencia de trabajo. El problema de las antenas tan directivas y con tan poco ancho de banda reside en que cualquier desviación respecto a la frecuencia deseada deja poco margen de error y ofrece un mínimo de adaptación en dicha frecuencia.

6. Presupuesto

En este apartado se llevará a cabo el cálculo del presupuesto del desarrollo e implementación física de los diseños mostrados en este proyecto, teniendo en cuenta tanto los recursos materiales y recursos humanos empleados en el desarrollo del mismo.

6.1 Recursos materiales

Los recursos materiales del proyecto vienen definidos por los elementos hardware y software para el diseño, simulación y análisis, así como los materiales empleados en la fabricación de los prototipos.

A continuación desglosamos los recursos materiales:

- Ordenador portátil
- Ordenador de sobremesa
- Software de diseño CST Studio
- Microsoft Office
- Conexión a Internet
- Analizador de redes (VNA)
- Impresora 3D
- Materiales de fabricación:
 - Láminas de policarbonato LEXAN
 - Tela metálica de cobre
 - Pegamento de contacto
 - Pegamento especial para metales
 - Soldadura
 - Material plástico ABS
 - Pintura con base de plata
 - Pinceles
 - Conectores de tipo SMA

6.2 Recursos humanos

Para la realización de este proyecto y sus distintas fases, ha sido necesario el trabajo y la implicación de una serie de personas internas y externas a la universidad que detallamos a continuación:

- Alumno - encargado de la recopilación de información, diseño y simulación de los prototipos, documentar los resultados y redactar la memoria y conclusiones del estudio.
- Tutora - encargada de la organización del proyecto, dirección y orientación sobre el alumno, así como gestionar las diferentes personas que intervienen en el proyecto.
- Técnicos de laboratorio – encargados de manejar el analizador de redes (VNA) para la caracterización de la antena. Así mismo, en la oficina técnica llevan a cabo la construcción de los prototipos y
- Laboratorio de creación digital y fabricación 3D de La Casa Encendida (Madrid) – Este centro socio-cultural dispone de un laboratorio de impresión 3D donde cualquier persona puede hacer uso de sus instalaciones dotadas de diversos tipos de máquinas de fabricación: plotter de corte de vinilo, cortadora y grabadora láser, impresoras 3D...Siempre con la ayuda del personal responsable del laboratorio. Disponen de una tabla de tarifas para las distintas máquinas en función de tiempo de uso.

6.3 Resumen del presupuesto

Para el cálculo final del presupuesto solo se tomará en cuenta el coste de los recursos materiales necesarios para fabricar los prototipos.

No se tomarán en cuenta los costes del hardware y software utilizados pues al ser material en propiedad no se considera necesario incluir un coste por uso.

Así mismo de los recursos humanos utilizados solo se computará la parte de fabricación mediante impresión 3D llevada a cabo por personal externo a la universidad. A su vez este coste ya viene contemplado en las tarifas que La Casa Encendida pone a disposición del público.

El coste de las horas dedicadas por el personal interno de la Universidad Carlos III de Madrid a este proyecto no está contemplado por ser difícil de cuantificar.

Por lo tanto, la tabla de costes totales será:

Material	Precio unitario	Cantidad	Total (€)
LEXAN	35 euros / m2	0.015 m2	0.53
Tela metálica cobre	3.5 euros / m2	0.014 m2	0.05
Pegamento contacto	8 euros / 5 gramos	1 gramo	1.60
Pegamento metales	7.50 euros / 22 ml	2 ml	0.70
Estaño soldadura	9.50 euros / 100 gramos	10 gramos	0.95

Pintura con base plata	30 euros / 5 gramos	3 gramos	18.00
Pinceles	1.50 euros / unidad	1 unidad	1.50
Impresión 3D	10 euros /hora (con material)	2 horas	20.00
Conectores tipo SMA	5.50 euros / unidad	3 unidades	16.50

Por lo tanto el presupuesto total de la fabricación e implementación física de nuestros prototipos asciende a **59.83 €**.

7. Marco regulador

El organismo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) produce normas y estándares aplicables a nivel europeo originalmente, y recientemente a nivel mundial para las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), incluidas las tecnologías fija, móvil, radio e Internet.

Este organismo define las redes LAN inalámbricas (WLAN) como redes destinadas a cubrir áreas geográficas más pequeñas, como hogares y oficinas

Aunque su uso no se restringe solo a eso sino que esta tecnología se ha desplegado para proporcionar conectividad de banda ancha en multitud de lugares públicos como aeropuertos, estaciones de tren, centros comerciales, hoteles y hostelería.

Su uso se ha extendido tanto que incluso proporciona conectividad inalámbrica y acceso a la red a los usuarios a bordo los distintos medios de transportes como avión, trenes, autobuses y vehículos particulares.

En la actualidad, la tecnología inalámbrica utilizada se basa en la familia de estándares IEEE 802.11, utilizando principalmente las bandas de frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz.

Sin embargo, otras tecnologías como la tecnología 4G y 5G (LTE-LAA) se están desplegando también en esas bandas de frecuencia. Lo que está provocando una reorganización del espectro radioeléctrico y un mejor aprovechamiento del mismo para que diversas tecnologías puedan coexistir entre ellas sin interferirse.

A día de hoy, la creciente demanda de velocidades de transmisión más rápidas y la sustitución continua de conexiones por cable por redes inalámbricas hacen necesario identificar otras bandas de frecuencia que ofrezcan suficientes prestaciones y capacidad, por ejemplo, la banda de frecuencia 60 GHz.

7.1 Estándares 802.11 y bandas de frecuencia

Hay varias estándares diferentes 802.11 actualmente en uso. A continuación se presenta un resumen de las bandas utilizadas por los sistemas 802.11:

IEEE 802.11 estándar	Banda de frecuencia utilizada
802.11a	5GHz
802.11b	2.4GHz
802.11g	2.4GHz
802.11n	2.4 y 5 GHz
802.11ac	Por debajo de 6GHz
802.11ad	Hasta 60 GHz
802.11af	Espacios en blanco de la TV (por debajo de 1 GHz)
802.11ah	700 MHz, 860MHz, 902 MHz, etc. Dependiendo de la asignación en cada país a estas bandas ISM

7.2 Canales en la banda de 2.4 GHz

Hay un total de catorce canales definidos para su uso por WiFi 802.11 para la banda de 2,4 GHz. No todos los canales están permitidos en todos los países, existen restricciones como veremos más adelante. En Europa, donde los canales han sido definidos por el ETSI, son trece los canales permitidos.

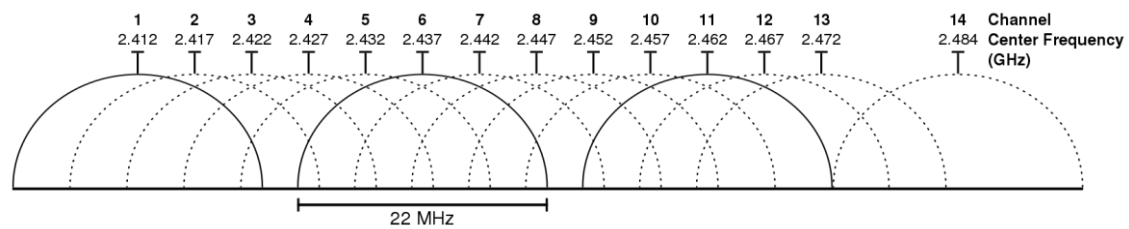
Los estándares WLAN 802.11 especifican un ancho de banda de 22 MHz y que los canales están separados 5 MHz (con la excepción de un espaciado de 12 MHz entre los dos últimos canales). Esto significa que los canales adyacentes se superponen y las señales en los canales adyacentes interfieren entre sí, lo que se conoce como superposición de canales y selección, esto significa que en un entorno con diferentes señales WiFi, cuanto más alejados estén unos canales de otros, mejor será el rendimiento.

7.3 Frecuencias de los canales WiFi en la banda 2,4 GHz

La siguiente tabla proporciona las diferentes frecuencias para el total de los catorce canales WiFi 802.11 disponibles en todo el mundo. También se muestran las diferentes restricciones de cada zona geográfica sobre algunos canales:

Número de canal	Frecuencia Min MHz	Frecuencia central MHz	Frecuencia Máx MHz	Europa (ETSI)	Norte América (FCC)	Japón
1	2401	2412	2423	✓	✓	✓
2	2406	2417	2428	✓	✓	✓
3	2411	2422	2433	✓	✓	✓
4	2416	2427	2438	✓	✓	✓
5	2421	2432	2443	✓	✓	✓
6	2426	2437	2448	✓	✓	✓
7	2431	2442	2453	✓	✓	✓
8	2436	2447	2458	✓	✓	✓
9	2441	2452	2463	✓	✓	✓
10	2446	2457	2468	✓	✓	✓
11	2451	2462	2473	✓	✓	✓
12	2456	2467	2478	✓	No	✓
13	2461	2472	2483	✓	No	✓
14	2473	2484	2495	No	No	802.11 b solo

Aquí podemos ver gráficamente la distribución en frecuencia de los canales:



Este gráfico proporciona una visión general, y puede haber variaciones entre los diferentes países. Por ejemplo, algunos países dentro de la zona europea tienen restricciones nacionales sobre el uso de determinados canales que pueden utilizarse, como Francia (canales 10-13) y España (10 y 11).

8. Conclusiones y líneas futuras

Por falta de tiempo, no pude llegar a medir la ganancia de las antenas fabricadas. El siguiente paso, y de cara a presentar dichos resultados en la sesión de defensa de este trabajo, se medirá la ganancia de las antenas en la cámara anecoica. Dicho proceso se llevará a cabo utilizando una antena de referencia estableciendo así un radioenlace con nuestro prototipo.

En líneas generales, hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos en los prototipos analizados mediante el analizador de redes (VNA) están sujetos a posibles interferencias producidas por diferentes señales (propio WiFi, 4G, etc) ya que se han realizado las medidas en un despacho y no en la cámara anecoica.

En este trabajo se ha establecido la frecuencia de trabajo en 2.4 GHz por ser el estándar del WiFi 2.4 GHz (802.11b/g/n). Como línea futura y si quisiéramos ser exactos con el estándar tendríamos que rediseñar las antenas para una frecuencia central de 2.45 GHz de manera que nos situásemos en el centro de las frecuencias de los canales en los que está dividido el estándar.

Aun así, y viendo los buenos resultados obtenidos, podemos comprobar que el diseño de este tipo de antenas transparentes o poco intrusivas visualmente objeto de este proyecto, es una solución viable y operativa. Además de incluir para su fabricación las más recientes tecnologías como la impresión 3D.

Por otro lado, en este proyecto me he familiarizado con el software de simulación CST Studio, que me será de gran utilidad de cara a mi vida laboral, pues es un software de gran utilización en el campo de las telecomunicaciones.

9. Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutora Eva Rajo Iglesias por darme la oportunidad de realizar este proyecto, el cual me ha parecido muy interesante y enriquecedor.

Ella ha sabido guiarme y ayudarme mucho a lo largo del desarrollo del mismo, con dedicación y paciencia.

Dar las gracias también a toda la gente del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, como José Luis Vázquez Roy, por su ayuda a la hora de analizar las antenas fabricadas.

Y por supuesto a Juan Pedro Perianes Rodríguez, técnico de laboratorio de la Oficina técnica, por su laborioso y preciso trabajo a la hora de fabricar los prototipos de las antenas.

10. Anexos

Anexo 1. Bibliografía

- [1] E. R. Escobar, N. J. Kirsch, G. Kontopidis and B. Turner, "5.5 GHz optically transparent mesh wire microstrip patch antenna," in *Electronics Letters*, vol. 51, no. 16, pp. 1220-1222, 8 6 2015.
- [2] Balanis Constantine A. *Antenna theory analysis and design*, 2 edición. 1997
- [3] Pozar D. M and D. H. Schaubert. *Microstrip Antennas*. 1995
- [4] T. W. Turpin and R. Baktur, "Meshed Patch Antennas Integrated on Solar Cells," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, no. , pp. 693-696, 2009.
- [5] Turpin, T. W., & Baktur, R. (2008). *See-through microstrip antennas and their optimization*. General Assembly of International Union of Radio Science; Chicago, IL.
- [6] Peter, T. (2012). *Optically transparent UWB antenna for wireless application & energy harvesting (Doctoral dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses)*.
- [7] J. R. Saberín and C. Furse, "Challenges with optically transparent patch antennas for small satellites," 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Toronto, ON, 2010, pp.1-4.
- [8] Clasen, G. and R. J. Langley, "Meshed patch antenna integrated into car windscreen," *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 9, 781–782, April 27, 2000.
- [9] Turpin, T. W. and R. Baktur, "Meshed patch antennas integrated on solar cells," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, 693–696, 2009.
- [10] J. R. Saberín and C. Furse, "Challenges with Optically Transparent Patch Antennas," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, no. 3, pp. 10-16, June 2012.
- [11] Balanis Constantine A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. 1989
- [12] Clasen, G. and R. Langley, "Meshed patch antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 6, 1412–1416, June 2004.
- [13] Song, H. J., T. Y. Hsu, D. F. Sievenpiper, H. P. Hsu, J. Schaffner, and E. Yasan, "A method for improving the efficiency of transparent film antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 7, 753–756, 2008.

- [14] Tursunjan Yasin, Reyhan Baktur , Timothy Turpin ,Jesus Arellano "Analysis and Design of Highly Transparent Meshed Patch Antenna Backed by a Solid Ground Plane" Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 56, 133–144, 2017
- [15] <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/radio-lan>
- [16] <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/80211-channels-number-frequencies-bandwidth.php>
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels
- [18] <http://shop.3dfilaprint.com/ekmps/shops/billyboyclyde/resources/Other/datasheet-abs-extrafill.compressed.pdf>
- [19] <https://www.usplastic.com/catalog/files/specsheets/LExan%209034%20-%20Sabic.pdf>
- [20] Microstrip Patch Calculator <http://www.emtalk.com/mpacalc.php>
- [21] Microstrip Line Calculator <http://www.emtalk.com/mscalc.php>

Anexo 2. Fotografías de los diseños fabricados

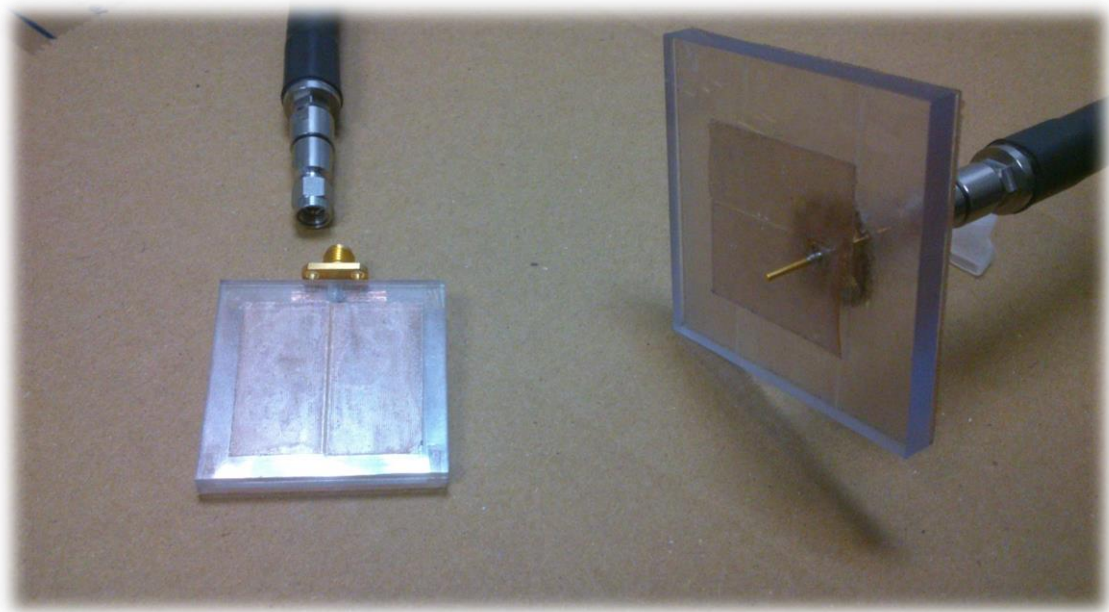


Foto 1. Prototipos fabricados con tela metálica de cobre.

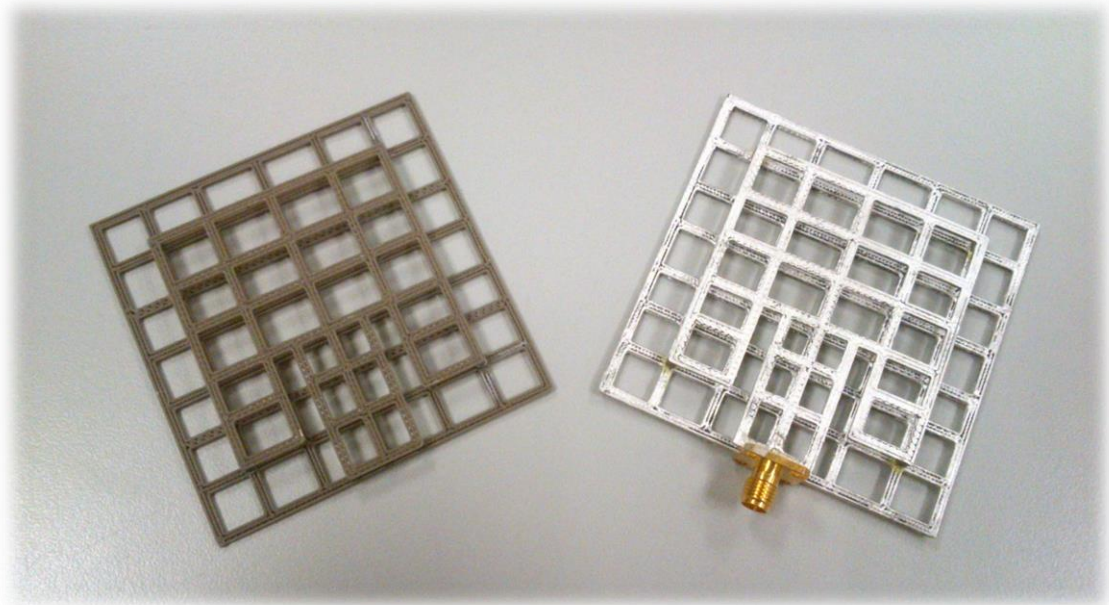
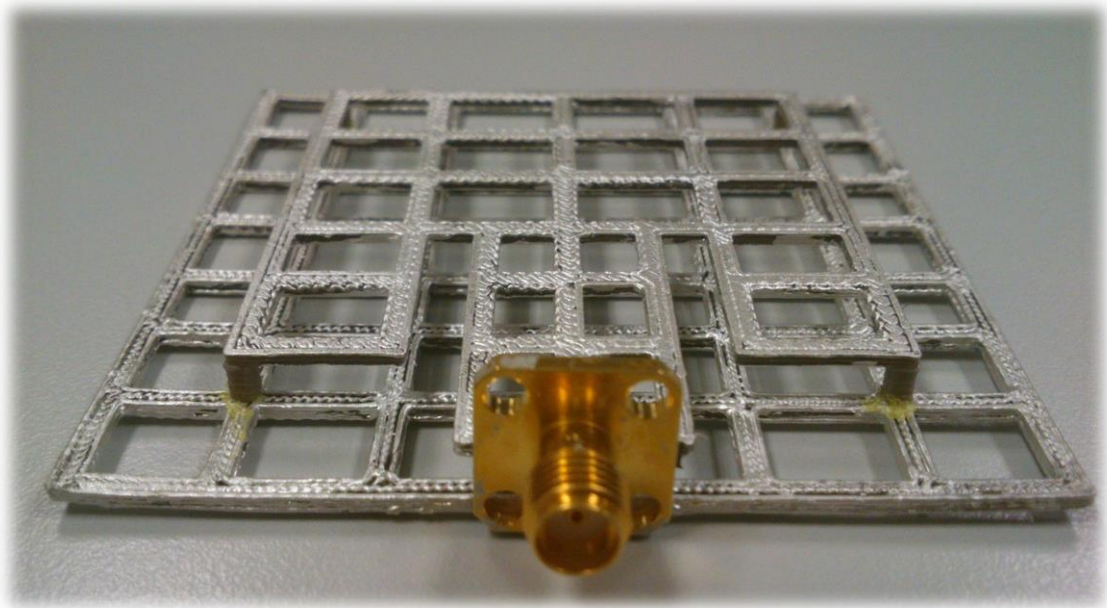
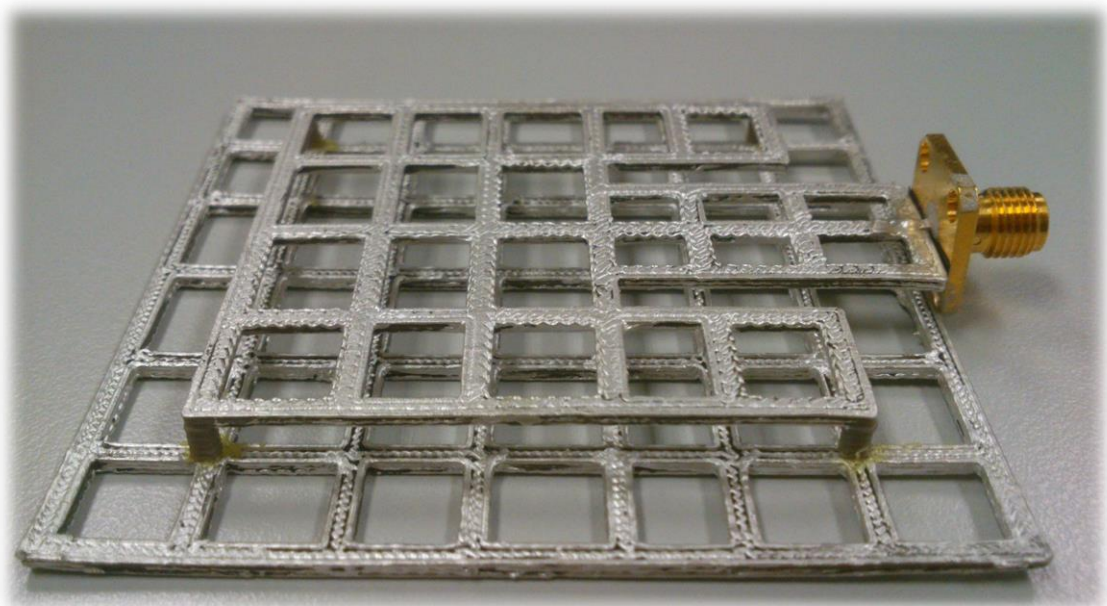


Foto 2. Prototipo fabricado con impresión 3D, antes y después de aplicar la pintura conductiva con base de plata.



Fotos 3 y 4. Detalle de la separación entre placas mediante pivotes y de la colocación del conector tipo SMA.



Anexo 3. Fotografías del proceso de testeo y caracterización

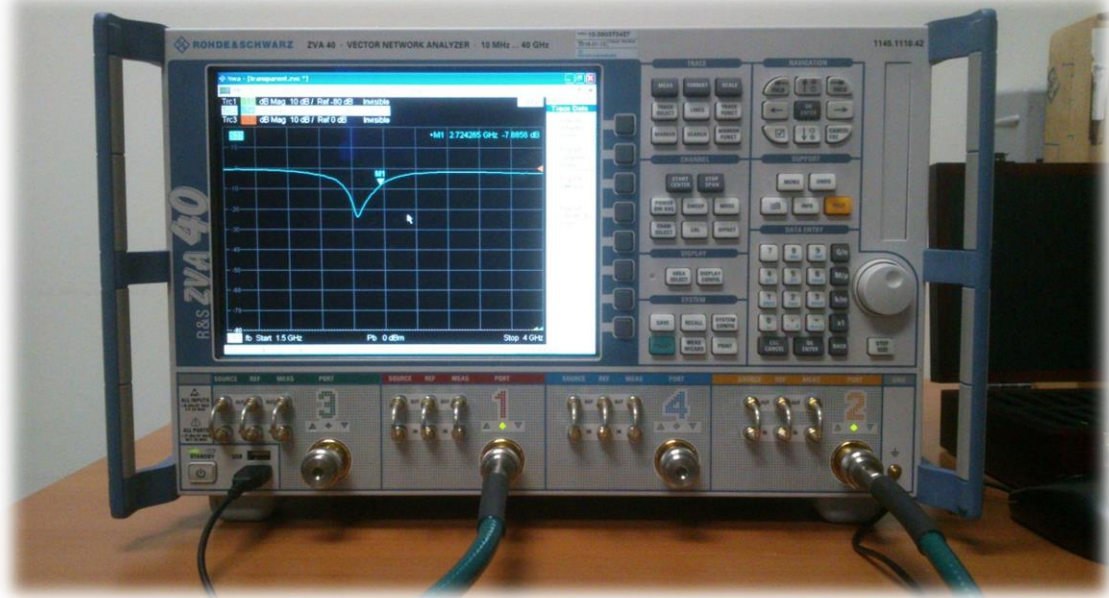


Foto 1. Observando el parámetro S_{11} de la antena en el VNA.

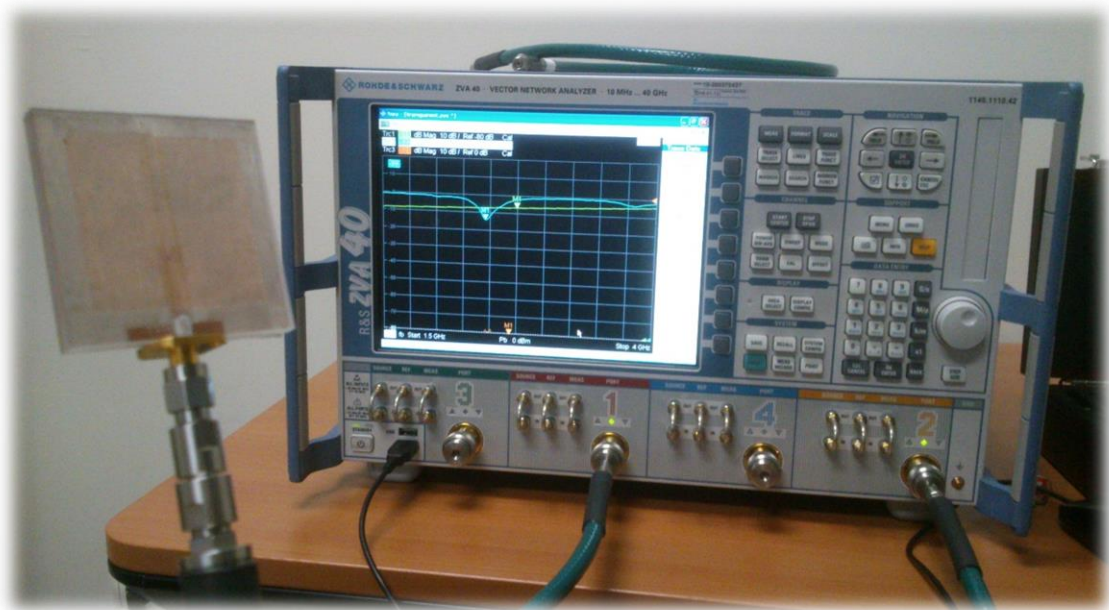


Foto 2. Conexión de la antena con el VNA mediante cable.

Anexo 4. Hojas de datos de materiales

SABIC
Innovative
Plastics™



Lexan* 9034 Sheet

Product Datasheet

Description

Lexan* 9034 uncoated polycarbonate sheet is the standard grade of Lexan sheet for transparent protective glazing. High-impact Lexan 9034 sheet may be an excellent candidate for primary glazing, or on either side of existing glazing for economical protection against breakage or intrusion. A better insulator than glass, Lexan 9034 sheet may contribute to lower energy costs.

Typical Property Values ♦

Property	Test Method	Unit	Value
Physical			
Specific Gravity	ASTM D792	—	1.20
Refractive Index @ 77°F	ASTM D542A	—	1.586
Light Transmission (Average), 1/8" disk	ASTM D1003	%	88
Rockwell Hardness	ASTM D785	—	M70
Abrasion Resistance, Taber Abrader, CS-17 wheel	ASTM D1044	mg/1,000 cycles	10
Water Absorption, Equilibrium, 24 hrs	ASTM D570	%	0.15
@ 73°F			0.35
@ 212°F			0.58
Mechanical			
Tensile Strength @ Yield	ASTM D638	psi	9,000
@ Ultimate			9,500
Tensile Modulus	ASTM D638	psi	345,000
Flexural Strength	ASTM D790	psi	13,500
Flexural Modulus	ASTM D790	psi	345,000
Flexural Endurance @ 1,800 cycles/min, 73°F, 50% RH	ASTM D671	psi	1,000
Compressive Strength	ASTM D695	psi	12,500
Compressive Modulus	ASTM D695	psi	345,000
Elongation	ASTM D638	%	110
Poisson's Ratio	—	—	0.37
Izod Impact Strength Notched @ 1/8"	ASTM D256A	ft-lbs/in	12–16
Unnotched @ 1/8"			60 (no failure)
Tensile Impact Strength, S-Type Specimen	ASTM 1822	ft-lbs/in ²	225–300
Shear Strength @ Yield	ASTM D732	psi	6,000
@ Ultimate			10,000
Shear Modulus	ASTM D732	psi	114,000
Deformation Under Load @ 4,000 psi @ 73°F	ASTM D621	%	0.2
@ 158°F			0.3
Thermal			
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM D696	in/in/°F	3.75 x 10 ⁻⁵
Coefficient of Thermal Conductivity	ASTM C177	Btu•in/hr•ft ² •°F	1.35
Specific Heat @ 40°C		cal/gm/°C	0.30
Heat Deflection Temperature @ 264 psi	ASTM D648	°F	270
@ 66 psi			280
Brittle Temperature	ASTM D746	°F	211
Flammability			
Horizontal Burn (Flame Spread) AEB	ASTM D635	in	<1

Electrical

Dielectric Constant @ 10 Hz	ASTM D150	—	2.96
@ 60 Hz			3.17
Volume Resistivity	ASTM D257	ohm-cm	8.2×10^{16}
Power Factor @ 60 Hz	ASTM D150		0.0009
@ 1,000,000 Hz			0.010
Arc Resistance	ASTM D495	sec	
Stainless Steel Strip Electrodes			10–11
Tungsten Electrodes			120

◆ These are typical properties and are not intended for specification purposes. If minimum certifiable properties are your local SABIC Innovative Plastics representative or SABIC Innovative Plastics Quality Services Department.

* Trademarks of SABIC Innovative Plastics IP BV

Lexan*



* Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

Americas:
SABIC Innovative Plastics
Specialty Film & Sheet
One Plastics Avenue
Pittsfield, MA 01201
USA
Tel. (1) (413) 448 5400
Fax. (1) (413) 448 7506
Toll free: 1-800 451 3147

Europe:
SABIC Innovative Plastics
Specialty Film & Sheet
Plasticslaan 1
NL - 4612 PX Bergen op Zoom
The Netherlands
Tel. (31) (164) 292911
Fax. (31) (164) 293272

Pacific:
SABIC Innovative Plastics
Specialty Film & Sheet
1266 Nanjin Road (W)
Plaza 66, 17th Floor
200040 Shanghai, China
Tel. (86) 21 62881088
Fax. (86) 21 62880818

THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right.

SABIC Innovative Plastics is a trademark of Sabic Holding Europe BV

* Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

www.sabic-ip.com

Latest update SABIC 01/2008



100 Mesh Copper .0012 48" Wide



Name	100 Mesh Copper .0012 48" Wide
Part Number	100X100C0012W48T
Material	Copper

Mesh	100 x 100 per inch (per 2.54 cm)	Wire Diameter	0.0012 inches 0.0305 mm
Opening Size	0.0088 inches 0.22 mm	Opening Area Percentage	79%
Overall Thickness	0.0024 inches 0.06096 mm	Weight	0.05 lb/sq foot 0.24 kg/sq meter
Full Roll Length	100 feet / 30.49 meters	Standard Widths	48 inches
Weave Type	PSW	Surface Finish Coating	Mill Finish
Purchasing UOM	Full Roll, Square Foot	Link to Product Page	Click here
Typical Uses	Optical shielded windows		
Comments	Extremely delicate, flimsy like cloth		

ABS Extrafill

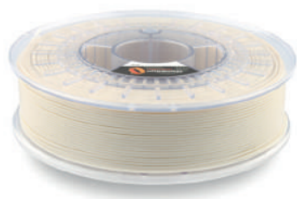
Description:

Fillamentum ABS Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

ABS filament is a polymer which is ideal for the production of the first functional samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.

Use of the ABS material in the food industry is dependent on the final product and responsibility for use on a processor ABS Extrafill. ABS is not intended for medical applications.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,04 g/cm³	ISO 1183	23 °C
Melt volume index	29 cm³/10 min	ISO 1133	220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	± 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	32 MPa	ISO 527	50 mm/min
Elongation at break	20 %	ISO 527	50 mm/min
Flexural strength	60 MPa	ISO 178	2 mm/min
Flexural modulus	1900 GPa	ISO 178	2 mm/min
Izod impact strength	24 kJ/m²	ISO 180	Method 1A, notched
Charpy impact strength	25 kJ/m²	ISO 179	notched
Ball indentation hardness	94	ISO 2039	H358/30

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Melting temperature	220-240 °C		
Heat distortion temperature	81 °C	ISO 75	1,8 MPa
Vicat softening temperature	103 °C	ISO 306	50 °C/h, 1 kg
	96 °C	ISO 306	50 °C/h, 5 kg
Flammability	1,5 mm HB	UL 94	
Coefficient of linear thermal expansion	9 · 10⁻⁵	ISO 11359	

Printing properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	220-240 °C		
Hot pad	90-100 °C		
Speed of printing	30-40 mm/s		

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.
The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum
nám. Míru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 725 453 731
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com